



**Universidade de  
Aveiro  
2017**

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Carlos Jorge  
Batista Sampaio**

**Mapeamento de vulnerabilidades decorrentes dos  
impactes dos sistemas de transportes rodoviários**





**Carlos Jorge  
Batista Sampaio**

## **Mapeamento de vulnerabilidades decorrentes dos impactes dos sistemas de transportes rodoviários**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica da Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor Jorge Filipe Marto Bandeira, Investigador de pós-doutoramento do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro dos projetos UID/EMS/00481/2013-FCT e CENTRO-01-0145-FEDER-022083

Este trabalho insere-se no âmbito do projeto @CRUiSE (PTDC/EMS-TRA/0383/2014), financiado no âmbito do Projeto 9471 – Reforçar a Investigação, o Desenvolvimento Tecnológico e a Inovação (Projeto 9471 – RIDTI) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER, e no âmbito do Projeto Estratégico UID-EMS-00481-2013.



**dedicatória**

Pais, irmão e avós



## **o júri**

Presidente

**Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho**

Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Coorientador

**Doutor Jorge Filipe Marto Bandeira**

Bolseiro de Pós-Doutoramento do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro

Arguente

**Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Agradecimento especial aos meus orientadores, Professora Dr. Margarida Coelho e Dr. Jorge Bandeira pela compreensão, ensinamentos e ajuda no desenvolvimento desta Dissertação.

Ao João, Eloísa, Mariana e aos restantes membros do grupo de investigação Transportation Technology do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação do departamento de Engenharia Mecânica, pela disponibilização de dados, conselhos e ajuda ao longo do desenrolar da Dissertação.

Às pessoas que me rodeiam diariamente, pais, irmão, avós e amigos por todo o apoio.



## palavras-chave

Transporte rodoviário, mapeamento de impactes, custos sociais, otimização de rota

## resumo

A relevância do transporte rodoviário no modelo de sociedade atual acarreta vários impactes do foro ambiental e social, como emissões de poluentes atmosféricos e acidentes rodoviários.

Esta dissertação propõe a criação de uma base de dados, num sistema de informação geográfica que organiza espacialmente a informação, para englobar várias vulnerabilidades recorrentes dos impactes do sistema de transportes, com incidência no transporte rodoviário, para identificação de pontos críticos e posterior utilização em algoritmos de otimização de rota.

Os impactes considerados foram as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e NMVOC, o nível de ruído e os acidentes rodoviários entre veículos e utentes vulneráveis. Foi ainda contabilizado os custos marginais das externalidades associados aos impactes considerados tendo cada segmento da rede rodoviária em estudo associada informação sobre estes impactes.

Com recurso ao mapeamento dos impactes considerados foi possível identificar vários pontos críticos de emissões e de sinistralidade rodoviária, tendo sido também testados dois problemas de otimização de rota, onde foi estudada a implementação de um fator associado à exposição da população local aos impactes e com o congestionamento, realçando a importância de ter estes dois fatores em conta numa futura plataforma de otimização de tráfego.

Ao utilizar um inventário de impactes organizado espacialmente num software de sistemas de informação geográfica é possível identificar zonas especialmente vulneráveis aos impactes, com algumas vias a terem um fator de emissão de CO<sub>2</sub> 90% superiores ao valor médio verificado, assim como otimizar a rota tendo em conta fatores como as emissões totais e o custo associado. Foi testado um fator de exposição às populações que fez aumentar o custo em cerca de 5%. No problema de otimização de rota onde foi testado a influência do congestionamento, foi possível verificar que as condições de tráfego têm o efeito de alterar os resultados finais. Foram testados vários tempos de viagem associados a uma rota mais curta (cerca de 700m em relação a uma rota alternativa) tendo-se verificado no caso de um veículo a gasolina, que a partir de um tempo de espera de cerca de 4 minutos, é compensatório do ponto de vista de redução de custos ambientais optar pela rota alternativa com percurso mais longo.

Como principal conclusão salienta-se a eficácia da base de dados em inventariar os impactes associados à rede rodoviária em estudo, tendo sido identificados alguns hotspots de impactes. Também foi possível verificar que as condições de tráfego e a exposição das populações são fatores importantes que devem fazer parte de uma futura plataforma de otimização de tráfego.



## **keywords**

Transportation impacts mapping , social costs, route optimization

## **abstract**

The relevance of road transportation in the current model society involves various environmental and social impacts such as pollutant emissions and road accidents.

The main objective of this Dissertation is the creation of a database based on geographic information systems, in order to organize spatially several road transportation impacts, for identification of vulnerabilities hotspots and later use in route optimization algorithms.

The impacts considered were CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and NMVOC emissions, traffic noise levels and road crashes between vehicles and vulnerable users (pedestrians and cyclists), as well as social costs associated with the considered impacts. Each segment of road network under study contains information on these impacts in order to use the database in route optimization algorithms. Using the mapping of the considered impacts, emissions and road accidents hotspots were identified. Two route optimization problems were conceived where other factors such as the population exposure to the impacts and traffic congestion were considered, emphasizing the importance of taking these two factors into account in a future traffic optimization platform.

By using a spatially organized inventory of impacts in a geographical information system, zones especially vulnerable to impacts were identified, with some road segments having a CO<sub>2</sub> factor 90% higher than the average, as well as optimizing the route taking in account factors like the total emissions and social costs. A population exposure factor was tested, which increased the social costs by about 5%. In the route optimization problem where the influence of congestion was tested, it was verified that the traffic conditions may affect the results. In a route 700m shorter than the other, were tested numerous travel times to analyze from which travel time is it worth to opt for the alternative, but longer route. For a petrol car it is worth to choose the alternative route for a travel time higher than 4 minutes in the shorter route.

As conclusions, one can state that a database of transportation impacts can be used to identify vulnerabilities hotspots. It was concluded that traffic conditions and population exposure to the impacts should be part of a future traffic optimization platform.



# Índice

---

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.1.1. Impactes ambientais.....	3
1.1.2. Impactes sociais .....	6
1.2. Objetivos .....	9
1.3. Estrutura da Dissertação .....	10
2. Revisão Bibliográfica .....	11
2.1. Impactes ambientais.....	11
2.1.1. Emissões.....	11
2.1.2. Ruído.....	12
2.2. Impactes sociais .....	13
2.2.1. Acidentes rodoviários .....	13
2.2.2. Congestionamento .....	14
2.3. Exposição das populações .....	15
2.4. Quantificação de externalidades do setor dos transportes.....	15
2.5. Otimização de rota.....	16
3. Metodologia .....	19
3.1. Cronograma e fluxograma .....	20
3.2. Recolha de dados.....	21
3.3. Quantificação de emissões de poluentes.....	23
3.3.1. Método VSP .....	23
3.3.2. Equações de regressão.....	25
3.4. Ruído.....	27

3.5.	Cálculo dos custos marginais das externalidades.....	30
3.6.	Exposição das populações .....	32
3.7.	Teste à plataforma.....	33
3.7.1.	Problema de otimização de rota 1 .....	33
3.7.2.	Problema de otimização de rota 2 .....	36
3.8.	Acidentes entre veículos e utentes vulneráveis .....	38
4.	Resultados e discussão.....	39
4.1.	Base de dados.....	39
4.2.	Acidentes entre veículos e utentes vulneráveis .....	47
4.3.	Resultados e discussão dos problemas de otimização considerados .....	50
4.3.1.	Problema de otimização de rota 1 .....	50
4.3.2.	Problema de otimização de rota 2 .....	56
5.	Conclusões e trabalhos futuros.....	59
6.	Referências bibliográficas.....	63
7.	Anexos .....	69
7.1.	Composição da frota automóvel portuguesa.....	69
7.2.	Quilómetros percorridos por tipo de veículo num ano .....	70



# Índice de tabelas

---

Tabela 1 - Número de vítimas mortais associadas a acidentes rodoviários na União Europeia (CE, 2017). .....	7
Tabela 2 - Velocidades consideradas para os troços onde não foram utilizados dados de dinâmica de veículos OSM (2017). Velocidade média para um veículo em regime free flow. ....	22
Tabela 3 - Equações e coeficiente de regressão para os poluentes considerados e respetiva tecnologia onde v representa a velocidade. Velocidade em km/h. ....	26
Tabela 4 - Valores absolutos e percentuais da discrepância na utilização dos dois métodos. ....	30
Tabela 5 - Fatores associados a vários poluentes recorrentes do tráfego rodoviário para Portugal (Korzhenevych et al., (2014)). ....	31
Tabela 6 - Fatores de correção aplicados. ....	33
Tabela 7 - Informação presente em cada link associado a um segmento da rede rodoviária. ....	39
Tabela 8 - Resultados obtidos no problema de otimização de rota 1 para um veículo diesel. ....	51
Tabela 9 - Deslastre do custo total por custo associado ao CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NMVOC e ruído para um veículo a diesel. ....	52
Tabela 10 - Resultados obtidos no problema de otimização de rota 1 para um veículo a gasolina. ....	53
Tabela 11 - Deslastre do custo total por custo associado ao CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NMVOC e ruído, para um veículo a gasolina. ....	54
Tabela 12 - Comparação de alguns parâmetros entre veículos a gasolina e a diesel. ....	55
Tabela 13 - Aumento percentual do custo final com a incorporação do fator de exposição às populações. ....	56



# Índice de figuras

---

Figura 1 - Distribuição modal do transporte de passageiros, em Portugal e na UE-28. (Adaptado de APA, 2016). .....	2
Figura 2 - Classificação da qualidade do ar em Portugal em várias regiões do país para o ano de 2015. Adaptado de APA., (2016).....	4
Figura 3 - Número de cidadãos europeus afetados pelo ruído proveniente de vários meios de transporte. (Adaptado de EEA, 2015). .....	5
Figura 4 - Número de mortes e a sua causa a nível Mundial para a população compreendida entre os 15 e os 29 anos. Adaptado de WHO (2015).....	6
Figura 5 - Número de vítimas mortais devido a acidentes rodoviários em Portugal entre o ano de 2001 e 2016 (adaptado de PORDATA, 2017b). .....	7
Figura 6 - Número de acidentes com vítimas em Portugal entre o ano de 2001 e 2016 (Adaptado de PORDATA, 2017b). .....	8
Figura 7 – Focos de congestionamento na Europa. Adaptado de Christidis e Rivas., (2012). .....	9
Figura 8 - Representação da rede rodoviária de Aveiro e qual a zona que foi alvo de estudo. ....	19
Figura 9 - Cronograma das tarefas realizadas ao longo da dissertação.....	20
Figura 10 - Fluxograma do desenvolvimento da plataforma. Lp – Nível de propagação sonora. ....	21
Figura 11 - Representação dos troços alvo de medições.....	22
Figura 12 - Emissões de CO <sub>2</sub> segundo a segundo.....	24
Figura 13 - Exemplificação de como se encontram os dados após tratamento da média das somas das emissões por segmento.....	24
Figura 14 - Curvas obtidas para veículos diesel.....	27
Figura 15 - Curvas obtidas para veículos gasolina.....	27
Figura 16 - Discrepância do nível sonoro de propagação por veículo entre o método de usar velocidade instantânea e usar velocidade média. ....	29
Figura 17 - Aplicação do fator de correção à zona de estudo. ....	32

Figura 18 - Rotas fornecidas pelo Google Maps para a viagem considerada (Google Maps., 2017). .....	34
Figura 19 - Representação das 3 rotas em estudo. a) Rota 1; b) Rota 2; c) Rota 3. ....	35
Figura 20 - Tráfego típico na Al. Silva Rocha. Segunda-feira 18h20min. Google Traffic (2017). .....	36
Figura 21 - Representação das 2 rotas em estudo. a) Rota 1a – trajeto natural; b) Rota 2ª – rota alternativa. ....	37
Figura 22 - Aplicação do fator associado ao congestionamento. ....	38
Figura 23 - Representação da velocidade média (km/h) obtida na rede em estudo. ....	40
Figura 24 - Ilustração dos níveis de ruído obtidos na rede em estudo. ....	40
Figura 25 – Fator de emissão de CO <sub>2</sub> em g/km para um veículo a diesel na rede em estudo. ....	41
Figura 26 – Fator de emissão de CO <sub>2</sub> em g/km para um veículo a gasolina na rede em estudo.....	41
Figura 27 – Fator de emissão de NO <sub>x</sub> em g/km para um veículo a diesel na rede em estudo. ....	43
Figura 28 – Fator de emissão de NO <sub>x</sub> em g/km para um veículo a gasolina na rede em estudo.....	43
Figura 29 – Fator de emissão de NMVOC em g/km para um veículo a diesel na rede em estudo.....	44
Figura 30 – Fator de emissão de NMVOC em g/km para um veículo a gasolina na rede em estudo.....	45
Figura 31 - Custos sociais associados em €/km para um veículo diesel. ....	46
Figura 32 - Custos sociais associados em €/km para um veículo a gasolina. ....	46
Figura 33 – Dispersão dos acidentes rodoviários e respetiva catalogação por utente vulnerável. ....	47
Figura 34 - Vias onde ocorreram mais de 3 acidentes entre veículos e peões para o período entre 2012 e 2015.....	48
Figura 35 - Vias onde ocorreram mais de 3 acidentes entre veículos e ciclistas para o período entre 2012 e 2015.....	48

Figura 36 - Mapa de calor dos vários acidentes que ocorreram assim como a localização dos mesmos por gravidade.....	50
Figura 37 - Custos ambientais associados a ambas as rotas para um veículo a diesel. ..	56
Figura 38 - Custos ambientais associados a ambas as rotas para um veículo a gasolina. .....	57



# Lista de abreviaturas e siglas

---

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

PM<sub>2,5</sub> – Partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm

PM<sub>10</sub> – Partículas com diâmetro inferior a 10 µm

O<sub>3</sub> – Ozono

NO<sub>2</sub> – Dióxido de azoto

NO – Monóxido de azoto

NO<sub>x</sub> – Óxidos de azoto

VOC – Compostos orgânicos voláteis

NMVOC – Compostos orgânicos voláteis não metilenos

HC – Hidrocarbonetos

SO<sub>2</sub> – Dióxido de enxofre

CO – Monóxido de carbono

L<sub>den</sub> - Indicador do nível de ruído global

L<sub>n</sub> – Indicador do nível de ruído noturno

L<sub>w</sub> – Nível de potência sonora

L<sub>p</sub> – Nível de propagação sonora

GPS – Sistema de posicionamento global

GNSS – Sistema de navegação por satélite

VSP – Potência específica do veículo





# 1. Introdução

---

Neste capítulo será exposta a motivação para a realização desta dissertação, prendendo-se esta nos vários impactes recorrentes do tráfego rodoviário, na forma de impactes ambientais (subcapítulo 1.1.1 – Impactes ambientais) e sociais (subcapítulo 1.1.2 – Impactes sociais). Os objetivos desta dissertação serão explicados no subcapítulo 1.2 e a sua estrutura no subcapítulo 1.3.

## 1.1. Motivação

---

O aumento da população urbana tem como consequência o aparecimento de novos desafios para os sistemas de transportes que compõem uma cidade. Atualmente cerca de 75% da população europeia vive em centros urbanos, tendo os países da União Europeia a segunda maior densidade populacional a nível mundial, cerca de 114 hab/km<sup>2</sup> (EEA, 2016). Em cidades de média dimensão, com uma menor densidade populacional em relação a grandes centros urbanos (por exemplo, o Porto conta com uma densidade populacional de 5229 hab/km<sup>2</sup> e Aveiro de 389 hab/km<sup>2</sup> (PORDATA, 2017a)) existem vários desafios à mobilidade devido à menor eficiência dos transportes públicos e à maior utilização do transporte individual (DGT, 2016).

Na União Europeia, o setor dos transportes é responsável por cerca de 33% da energia primária consumida e destes, 82% é consumida pelo transporte rodoviário (APA., 2016). Em Portugal o setor dos transportes é o setor de atividade que mais consome energia primária, cerca de 36,5% em 2015 (APA, 2016) sendo que em cerca de 89% dos quilómetros percorridos associados ao transporte rodoviário é utilizado o veículo particular como é possível verificar na figura 1 (EEA, 2016) (APA., 2016). A utilização do veículo particular dentro das cidades acarreta impactes ambientais, como poluição atmosférica e poluição sonora, e impactes sociais, como acidentes rodoviários e congestionamentos; urge, portanto, a necessidade de tornar o sistema de transportes mais sustentável tanto do ponto de vista energético como ambiental.

É possível verificar na figura 1 que a utilização de transporte individual em Portugal é bastante elevada e superior à média europeia. Neste contexto, sem prejuízo das estratégias de mobilidade focadas em incrementar o uso de transportes públicos e modos suaves, importa potenciar o uso do transporte individual de forma mais sustentável.

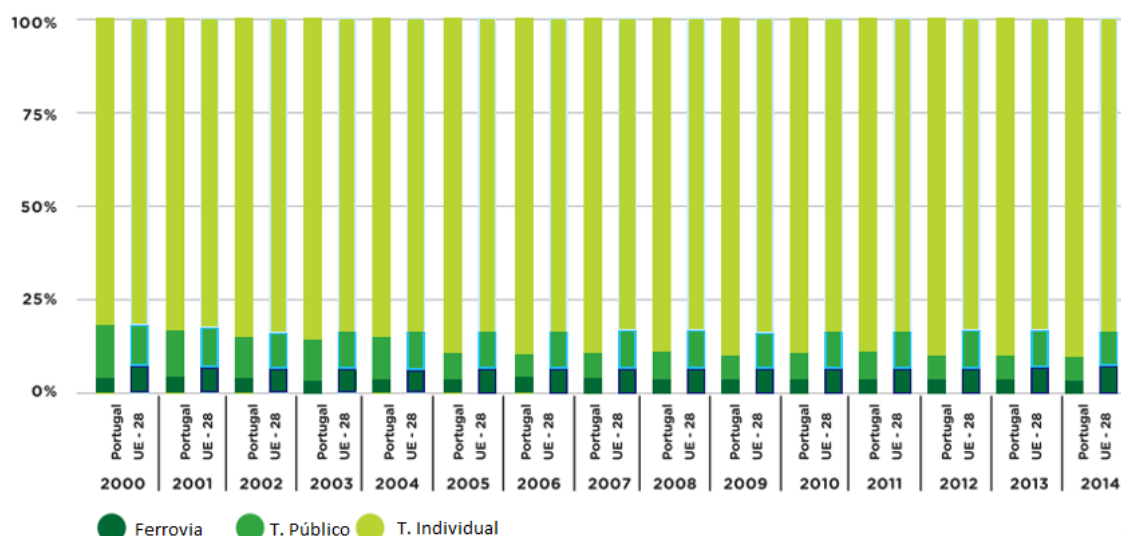


Figura 1 - Distribuição modal do transporte de passageiros, em Portugal e na UE-28. (Adaptado de APA, 2016).

A eco-condução pode ser vista como uma ferramenta para reduzir consumos de combustível, emissões de poluentes e diminuição da sinistralidade rodoviária. Uma das vertentes da eco-condução prende-se com os sistemas de eco-navegação que avaliam as várias rotas disponíveis para uma certa viagem, e quantificar os seus impactes, permitindo escolher a rota que mais beneficie o utilizador tendo em conta as suas preferências, que podem ser do ponto de vista do tempo de viagem, emissões e consumo de combustível, sendo, portanto, um conceito aplicável e útil numa perspetiva de gestão de tráfego (Boriboonsomsin et al., 2012).

Os SIG são utilizados como uma ferramenta de apoio na análise de um sistema de transportes: otimização de rotas, localização de paragens de transportes públicos, mobilidade, acessibilidade, previsão do tempo de viagem, risco de acidentes, gestão de tráfego e mobilidade sustentável. (Gianpiero et al., 2015).

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é uma ferramenta útil na gestão de tráfego. Normalmente os gestores de tráfego armazenam a informação em tabelas que se podem tornar de difícil perceção dificultando a visualização de problemas na rede rodoviária. Com os SIG a informação estará organizada numa perspetiva espaço-temporal, o que permite uma melhor visualização do comportamento do tráfego rodoviário (Bright Hub Engineering., 2010). A utilização de SIG na área dos transportes permite uma melhor organização e disponibilidade dos dados através do estudo da distribuição em termos espaço-temporais de vários fatores impactantes numa rede rodoviária, como a poluição atmosférica e os acidentes rodoviários, sendo uma ótima ferramenta de apoio à criação de novas políticas (Luo et al., 2017), podendo também ser utilizados numa perspetiva comercial, mapeando as melhores rotas que permitam as empresas de transporte de passageiros gastar menos combustível ou diminuir o tempo de viagem (Wang e Xu., 2016). Os SIG também poderão ser uma ferramenta de apoio à multimodalidade, que é uma das soluções para tornar o sistema de transportes dentro de uma cidade mais eficiente, pois

por vezes um só meio de transporte não cobre todos os locais necessários. Gianpiero et al. (2015) testaram uma solução baseada em SIG, que se revelou eficaz, de apoio à multimodalidade, através da utilização de ferramentas para mapear e modelar toda a rede rodoviária, que permitiu facilitar a tomada de decisão e oferecer a oportunidade de uma melhoria contínua possibilitando verificar quais os impactos que medidas tomadas estão a ter no dia-a-dia do sistema de transportes.

### **1.1.1. Impactes ambientais**

---

A poluição atmosférica é um impacto de elevada importância ambiental e social, sendo ao mesmo tempo um tema bastante complexo que enfrenta vários desafios em termos de gestão e mitigação dos poluentes potencialmente prejudiciais à saúde humana e aos gases com efeito de estufa (EEAb, 2016). Na União Europeia, do total dos gases com efeito de estufa emitidos, cerca de 23,2% são emitidos pelo setor dos transportes e em termos de CO<sub>2</sub>, este setor é responsável por 28,1% das emissões (EEAa, 2016). Outros poluentes relevantes, com impacto principalmente na saúde humana são as PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub>. As concentrações destes poluentes encontram-se várias vezes acima dos valores impostos pela legislação Europeia, a população europeia encontra-se exposta a valores acima dos permitidos, em relação a um ano civil, cerca de entre 8% a 12% para as PM<sub>2,5</sub>, 16% a 21% para as PM<sub>10</sub>, 8% a 17% para o O<sub>3</sub> e 7% a 9% para o NO<sub>2</sub> acima dos valores recomendados (EEAb, 2016). Estes valores representam impactos a nível de saúde humana, pois todos os poluentes citados potenciam o aparecimento de doenças do foro respiratório e cardiovascular, estimando-se que ocorram anualmente cerca de 500.000 mortes prematuras devido à poluição atmosférica dentro da União Europeia. A poluição atmosférica tem também impacto ao nível dos ecossistemas, podendo afetar a vegetação, a qualidade da água e dos solos. A poluição do ar pode também ter impactos a nível da herança cultural existente na União Europeia, acelerando a degradação de vários monumentos, devido aos agentes acidificantes presentes em alguns poluentes que aceleram a corrosão de alguns monumentos e edifícios (EEAb, 2016).

Nos últimos anos tem havido um esforço por parte da Comissão Europeia em legislar e aplicar metas e limites quanto à poluição atmosférica, realizando várias diretivas que impõe limites nos poluentes mais relevantes, como as PM, CO, NO<sub>x</sub>, metais pesados, O<sub>3</sub> e VOC. Várias metas foram estabelecidas quanto aos gases com efeito de estufa e ao CO<sub>2</sub>, em 2021, o limite das emissões de CO<sub>2</sub> por veículo é de 95 g CO<sub>2</sub>/km. Quanto aos gases com efeito de estufa, em 2030 as emissões devem reduzir 20% (em relação aos níveis do ano de 2008) e pelo menos 60% até 2050 (em relação ao ano de 1990) (EEA, 2015).

O Instituto da Qualidade do Ar (IQAr) classifica a qualidade do ar em 5 classificações como «Muito bom», «Bom», «Médio», «Fraco» e «Mau», classificações obtidas de acordo com a concentração dos vários poluentes atmosféricos (APA., 2016). Na figura 2 é possível verificar como esteve a qualidade do ar em Portugal no 2015 em várias regiões do País.

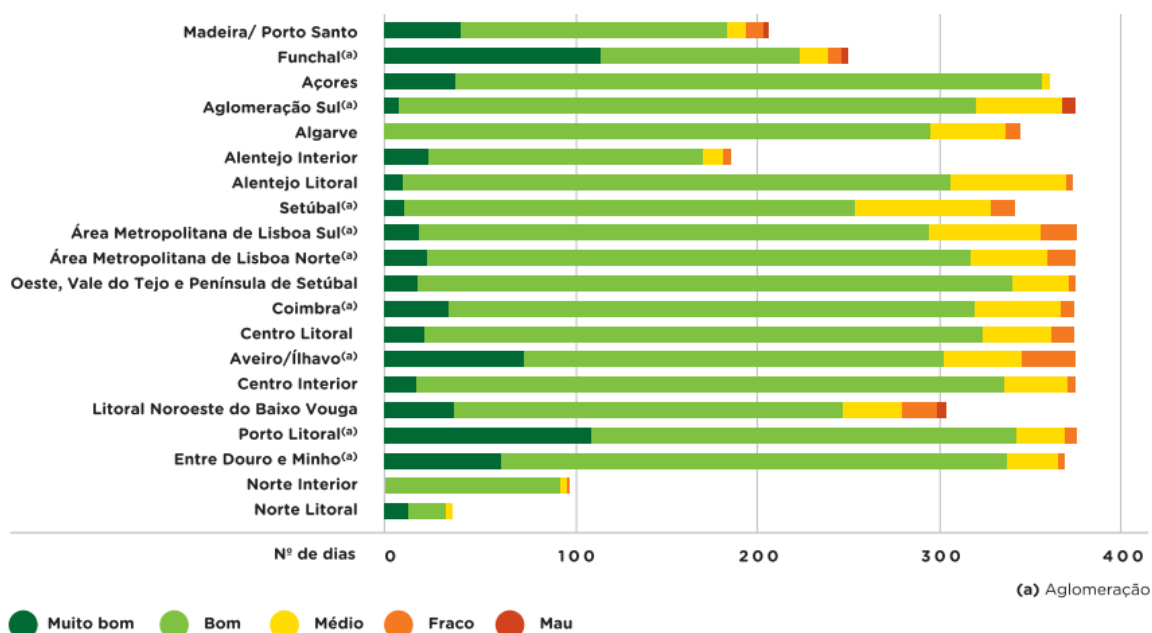


Figura 2 - Classificação da qualidade do ar em Portugal em várias regiões do país para o ano de 2015. Adaptado de APA., (2016).

A classe predominante é o «Bom», tendo apenas existido cerca de 2,7% dos dias com uma classificação de «Fraco» ou «Mau».

Por sua vez a poluição sonora tem efeitos adversos na qualidade de vida dos seres-humanos, tendo sido reconhecido nas últimas décadas como um problema de saúde pública. É estimado que um em cada quatro europeus é afetado por níveis de ruído prejudiciais devido ao tráfego automóvel, sendo que o ruído é responsável por cerca de 10.000 mortes prematuras por ano dentro da União Europeia. O ruído proveniente do tráfego rodoviário é a principal fonte de poluição sonora de acordo com vários mapas de ruído, estimando-se que cerca de 125 milhões de pessoas estão potencialmente expostas a níveis de ruído superiores aos legislados (55 dB  $L_{den}$ ) (EEA, 2015). Na figura 3 é possível verificar o número de pessoas expostas a níveis de ruído superiores aos recomendados por diretrizes europeias.

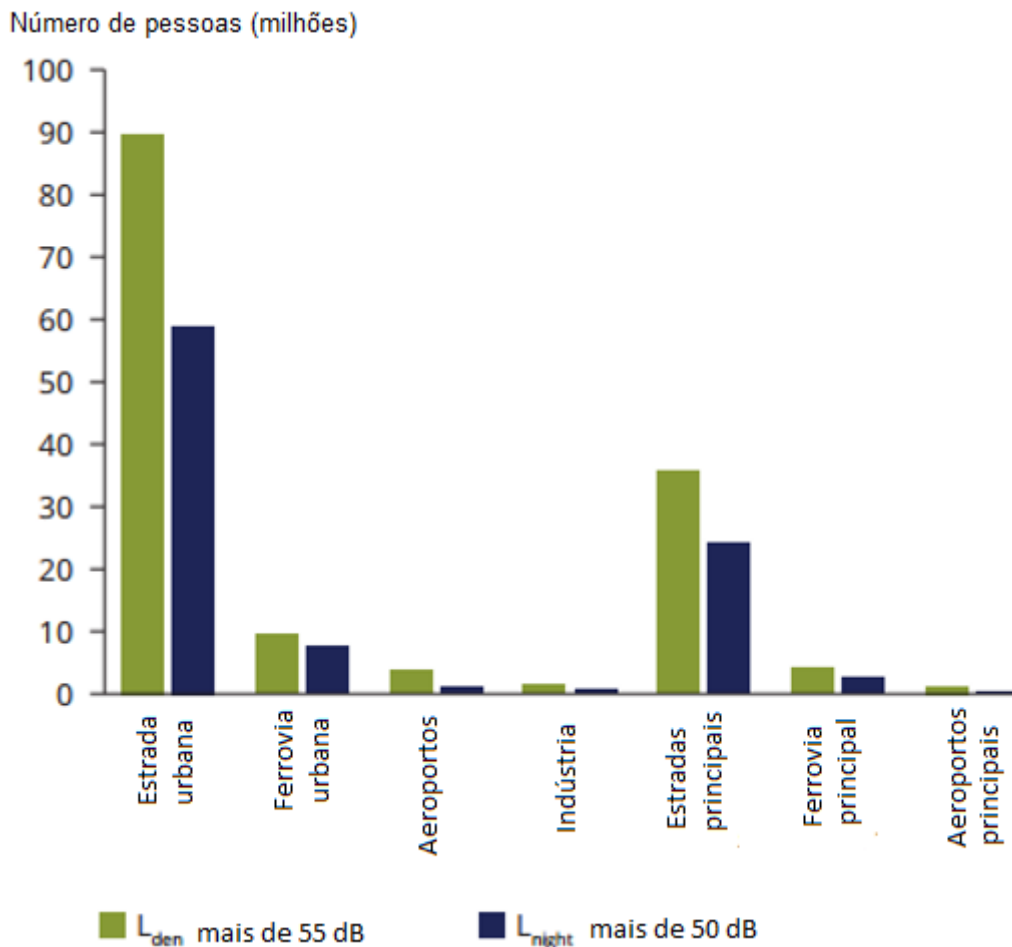


Figura 3 - Número de cidadãos europeus afetados pelo ruído proveniente de vários meios de transporte. (Adaptado de EEA, 2015).

Nos últimos anos várias medidas foram propostas para mitigar a poluição sonora, podendo estas serem praticadas na fonte, através do tipo de pneus, pavimento da estrada, aerodinâmica do veículo e gestão de tráfego, ou diminuindo a exposição das populações ao ruído, através de medida anti propagação e medidas de isolamento das habitações. Grande parte da legislação realizada pela União Europeia tem como objetivo diminuir o ruído através da implementação de medidas na fonte, pois é considerado que estas têm maior custo-benefício, podendo algumas medidas serem a criação de limites para o ruído produzido pelo motor dos veículos, a promoção de pneus mais silenciosos e o desenvolvimento de pavimentos mais silenciosos. Uma medida bastante utilizada que visa diminuir a propagação do ruído é a implementação de barreiras acústicas, que podem reduzir o ruído na gama dos 3-6 dB (A). O ruído pode ser diminuído também através de medidas de controlo e planeamento de tráfego, limitando a velocidade máxima para os 50-80 km/h tendo esta medida também impacte na redução das emissões (EEA., 2015).

Em Portugal existe o Regulamento Geral do Ruído, onde se encontram definidos os limites sonoros que devem ser respeitados, divididos por zonas e período diurno e noturno. Uma zona mista («a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja

ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível») não deve ser exposta a ruído ambiente exterior superior a 65 db (A) durante o dia, expresso pelo indicador  $L_{den}$ , e 55 db (A) durante a noite, expresso pelo indicador  $L_n$ . Uma zona sensível (área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, escolas hospitalares, espaços de lazer, entre outros) não deve ser exposta a ruído ambiente exterior superior a 55 dB (A) durante o dia, expresso pelo indicador  $L_{den}$ , e 45 dB (A) durante a noite, expresso pelo indicador  $L_n$  (DL n.º 9/2007, de 17 de Janeiro).

### 1.1.2. Impactes sociais

Os acidentes rodoviários encontram-se entre os principais impactes sociais do setor dos transportes ocorrem cerca de 1,25 milhões de mortes a nível mundial devido a acidentes rodoviários, sendo a principal causa de morte nas idades compreendidas entre os 15 e os 29 anos (figura 4) (WHO, 2015).

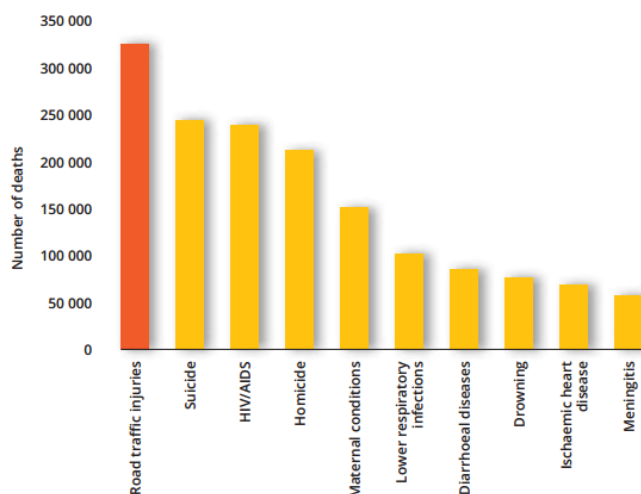


Figura 4 - Número de mortes e a sua causa a nível Mundial para a população compreendida entre os 15 e os 29 anos. Adaptado de WHO (2015).

É nos países menos desenvolvidos em que o rápido crescimento económico tem levado à procura de uma crescente motorização da população que apresentam piores resultados em termos de segurança rodoviária, sendo em África que ocorre o maior número de mortes por número de veículos, enquanto que a Europa apresenta números mais baixos. O impacto económico dos acidentes rodoviários nos países menos desenvolvidos é de cerca de 3% do produto interno bruto (WHO., 2015). Apesar da elevada mortalidade associada aos acidentes rodoviários, grande parte destes podem ser evitáveis, existindo países que investiram seriamente na segurança rodoviária alcançando os resultados a nível de número de mortes na União Europeia expostos na tabela 1.

Tabela 1 - Número de vítimas mortais associadas a acidentes rodoviários na União Europeia (CE, 2017).

Ano	Nº de vítimas mortais
1990	77 337
2000	57 082
2005	45 943
2010	31 506
2014	25 974
2015	26 134

É possível verificar que houve uma grande descida no número de vítimas mortais se compararmos o ano de 1990 com o ano de 2015. No entanto entre o ano de 2014 e o ano de 2015 houve uma ligeira subida no nº de fatalidades com um aumento de cerca de 0,7%.

Na União Europeia existem cerca de 51 mortes na estrada por cada milhão de habitantes, sendo o valor para Portugal ligeiramente superior, cerca de 57 mortes na estrada por cada milhão de habitantes (CE, 2017). Na figura 5 é possível verificar o histórico de mortes na estrada em Portugal entre o ano de 2001 e 2016 (PORDATA, 2017b).

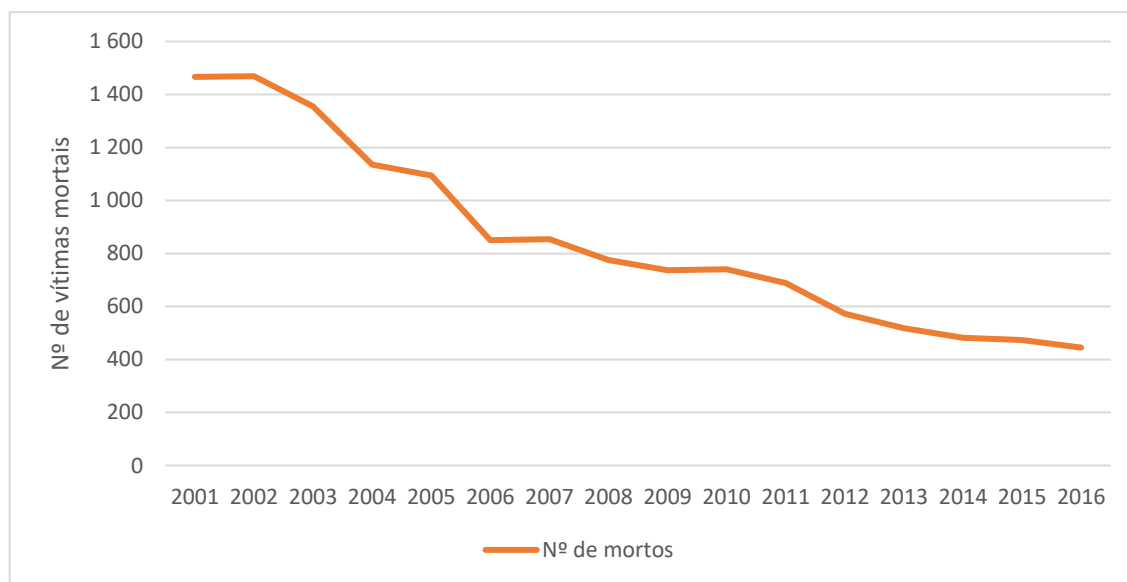


Figura 5 - Número de vítimas mortais devido a acidentes rodoviários em Portugal entre o ano de 2001 e 2016 (adaptado de PORDATA, 2017b).

Analisando a figura 5 é possível verificar que o número de vítimas mortais baixou consideravelmente entre o ano de 2001 e o ano de 2016, havendo uma quebra bastante

acentuada entre o ano de 2002 e 2006, com o número de mortes a descer mais lentamente a partir desse ano.

Na figura 6 é possível verificar o histórico entre 2001 e 2016 relativo aos acidentes com vítimas (PORDATA, 2017).

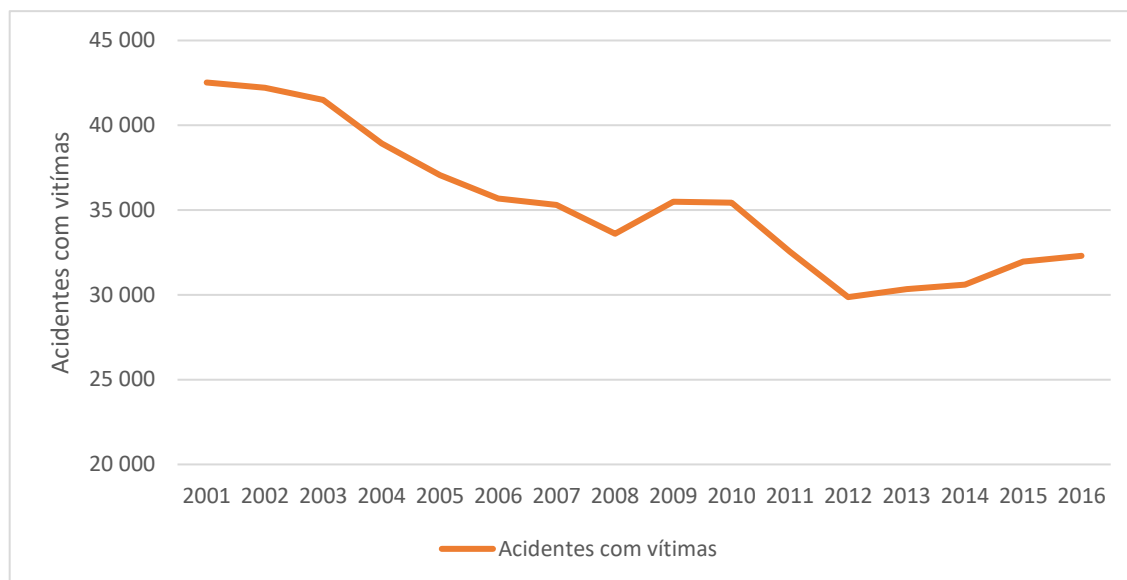


Figura 6 - Número de acidentes com vítimas em Portugal entre o ano de 2001 e 2016 (Adaptado de PORDATA, 2017b).

Ao se realizar uma comparação simples entre o número de acidentes com vítimas (feridos leves, graves e vítimas mortais) entre o ano de 2001 e 2016 podemos verificar que este valor baixou, cerca de 24%. No entanto é possível apurar na figura 6 um ligeiro retrocesso a nível deste indicador nos últimos anos com o valor de número de acidentes com vítimas a aumentar a partir do ano 2012 até ao ano 2016 após uma acentuada quebra entre 2010 e 2012.

Pretende-se que dentro do espaço Europeu o número de fatalidades recorrentes de acidentes rodoviários seja zero para o ano de 2050, assim como diminuir para metade para o ano de 2020. Para alcançar este número, entre algumas medidas que poderão ser aplicadas encontram-se (CE, 2011):

- Utilização de tecnologias de segurança rodoviária, como por exemplo sistemas de apoio ao condutor, limitadores de velocidade, dispositivos de comunicação de uma emergência e melhorar os ensaios de inspeção técnica.
- Elaborar uma estratégia comum de ação para os feridos na estrada e os serviços de emergência, de forma a agilizar e tornar mais efetiva a ação dos mesmos.
- Apostar na educação para a segurança rodoviária.
- Infraestruturas e tecnologias de veículos mais seguras.



Por sua vez, o congestionamento proveniente do tráfego rodoviário é um dos principais problemas que afeta as cidades. É estimado que o custo do congestionamento na UE é de cerca de 1% do seu PIB (Christidis e Rivas, 2012). Várias cidades europeias são afetadas por um atraso superior a 45 segundos por quilómetro como é possível verificar na figura 7 (Christidis e Rivas, 2012).

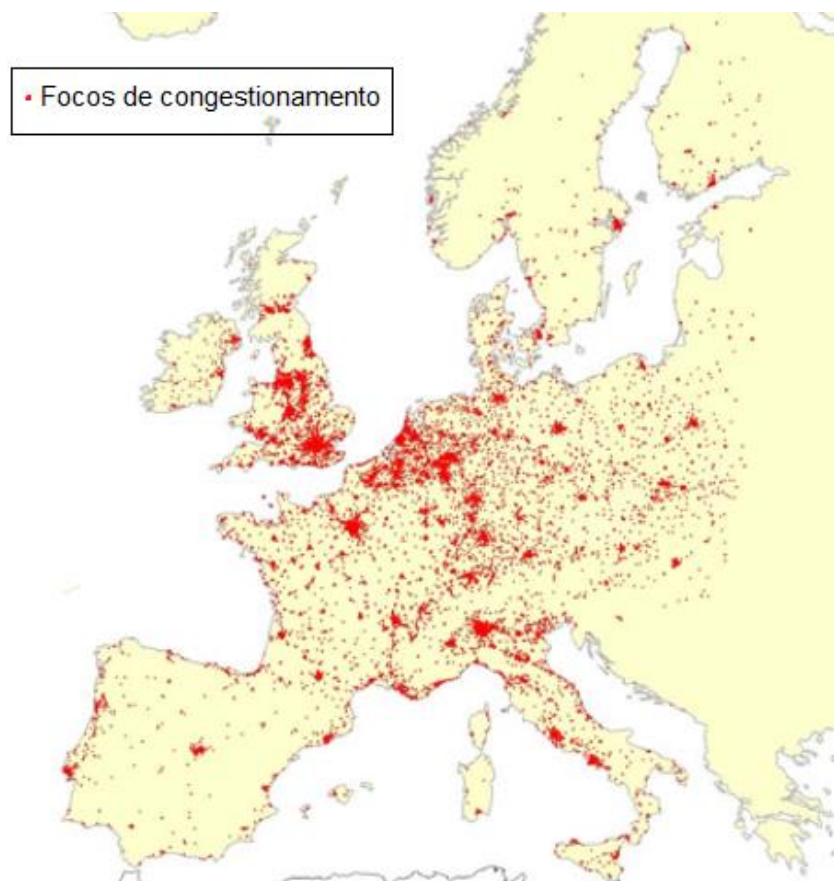


Figura 7 – Focos de congestionamento na Europa. Adaptado de Christidis e Rivas., (2012).

Na Europa existem vários centros urbanos com problemas de congestionamento. Em Portugal estes problemas centram-se mais na área metropolitana de Lisboa e do Porto.

## 1.2. Objetivos

---

O objetivo central desta dissertação prende-se com a criação de uma base de dados, num *software* de sistemas de informação geográfica onde se englobam várias vulnerabilidades recorrentes dos impactes do sistema de transportes, com incidência no transporte rodoviário, para identificação de *hotspots* e posterior utilização da base de dados em algoritmos de otimização de rota.

Os objetivos específicos para este trabalho foram:

- Realização de um inventário de impactes recorrentes do transporte individual rodoviário na cidade de Aveiro assente num *software* de Sistemas de Informação Geográfica;
- Identificação de *hotspots* de emissões, acidentes rodoviários e de ruído na rede em estudo;
- Realização de testes de otimização de rota à base de dados de forma a verificar a influência da inclusão de mais fatores de impacto como a exposição da população e o congestionamento.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

---

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos:

No primeiro capítulo encontra-se a introdução, onde é realizada a caracterização do setor dos transportes a nível energético e ambiental. É também neste capítulo exposta a motivação para a realização desta dissertação onde se descrevem vulnerabilidades recorrentes dos impactes do tráfego rodoviário, na forma de impactes ambientais e sociais. Por fim são definidos os objetivos desta dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica das várias temáticas discutidas nesta dissertação, nomeadamente ao nível do mapeamento de impactes ambientais e sociais, da exposição das populações aos impactes, da quantificação das externalidades do setor dos transportes e da otimização de rota.

O capítulo três corresponde à descrição da metodologia utilizada na elaboração da dissertação, desde a exposição do cronograma e fluxograma, descrição da área em estudo, os métodos subjacentes à recolha de dados e posterior estimativa dos impactes considerados assim como o seu custo associado. Foram também colocados problemas de otimização de rota com vista a testar a plataforma bem como a inclusão de outros fatores que exemplificam a inclusão de outros impactes na plataforma, como a exposição da população aos impactes considerados e o congestionamento.

No quarto capítulo estão expostos os resultados obtidos bem como a discussão dos mesmos, desde a exemplificação em mapas dos vários impactes considerados para identificação de *hotspots*, até aos problemas de otimização de rota considerados.

Por fim, no capítulo cinco finaliza-se este documento com as conclusões assim como são sugeridos trabalhos futuros para melhorar a base de dados.

## 2. Revisão Bibliográfica

---

Nesta secção é realizada a revisão bibliográfica tendo em conta os impactes ambientais (emissões e ruído), impactes sociais (acidentes de tráfego e congestionamentos), exposição das populações, quantificação de externalidades associadas ao transporte rodoviário e otimização de rotas com objetivos ambientais.

### 2.1. Impactes ambientais

---

Nos próximos subcapítulos encontra-se a revisão bibliográfica na aplicação de SIG no âmbito dos impactes ambientais (emissões e ruído).

#### 2.1.1. Emissões

---

Em várias cidades, países e regiões foram realizados estudos, onde foram concretizados inventários de emissões com um objetivo meramente informativo, de ordenamento do território, identificação de *hotspots*, para otimização de rota, entre outros fins.

Em várias cidades da Índia, estão a ser utilizados SIG de forma a analisar a poluição proveniente do tráfego rodoviário. Uma plataforma baseada em SIG foi desenvolvida por Rao et al. (2017) que consiste em inventariar as emissões relacionadas com o tráfego rodoviário na cidade de Hyderabad (Índia), nomeadamente o CO<sub>2</sub>, HC e o CO. As emissões foram organizadas espacialmente num *software* de SIG e podem ser utilizadas futuramente como uma ferramenta de planeamento (Rao et al., 2017). Também na Índia, mas na cidade de Lucknow, Singh et al., (2016) criaram um inventário de emissões provenientes do setor dos transportes baseado em SIG para dessa forma ajudar ao planeamento desta cidade. Em ambos os casos de estudo realizados por Rao et al. (2017) e Singh et al. (2016), o inventário de emissões concretizado será essencial para melhorar o ordenamento do território e identificar *hotspots* de emissões que exijam ação imediata.

Também na Índia, no estado de Goa, foi realizado um inventário de emissões por Sharma e Patil (2016). Os valores observados para a concentração de poluentes como PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> demonstram violações dos limites impostos em várias localizações. Através do mapeamento foi possível identificar que em termos setoriais a mineração é o principal responsável por cerca de 38% das emissões de PM<sub>10</sub>, sendo o setor dos transportes responsável por cerca de 25%. Um grande foco de emissões é detetado principalmente em zonas densamente povoadas e industrializadas, as PM<sub>10</sub> são responsáveis por cerca de 2,6% das mortes prematuras em Goa (Sharma e Patil, 2016).

Num mapa de emissões, as emissões provenientes de zonas industriais e de zonas de produção de energia estão normalmente bem documentadas e assinaladas, mas o mesmo não se pode dizer acerca das emissões provenientes do setor dos transportes devido à dificuldade existente em aferir com certeza elevada o nível de emissões associado a um troço de uma rede rodoviária. É então necessário utilizar modelos de forma a aferir quais as emissões associadas a um segmento de rede específico. Foi realizado por Puliafito et

al. (2015) um mapeamento de emissões por parte do setor dos transportes na Argentina baseado em SIG através da utilização da informação que se encontrava disponível, com uma resolução de cerca de 9 km. A variável principal utilizada foi a atividade do veículo estimado através do consumo de combustível por zona e a eficiência do mesmo, sendo a mesma distribuída por uma hierarquia de rotas assim como o seu comprimento. De forma a obter a atividade do veículo foi necessário adquirir o valor das vendas de combustível nos vários postos de combustível espalhados pelo país, a densidade populacional, comprimento e características das várias estradas, e imagens de satélite noturnas para verificar a atividade noturna nas várias rotas (Puliafito et al. 2015).

Foi realizado um mapeamento de emissões provenientes do setor dos transportes na zona metropolitana de Atenas (região de Attica), a zona com piores índices de poluição do ar devido ao elevado tráfego automóvel, condições topográficas e condições meteorológicas. Foi utilizado o modelo COPERT 4 para calcular as emissões totais anuais (para o espaço temporal de 2006 a 2010) por parte do setor dos transportes com uma resolução espacial de 2 X 2 km<sup>2</sup> para a região de Attica e 6 X 6 km<sup>2</sup> para o resto da Grécia. Foi concluído através do mapeamento que cerca de 40% das emissões nacionais de CO<sub>2</sub>, CO e NMVOC e 30% das emissões nacionais de NO<sub>x</sub> são emitidas na zona de Attica. A composição da frota automóvel, a penetração de carros com tecnologia *diesel*, o aumento da velocidade urbana média e a renovação das frotas são os fatores mais determinantes para se desenvolver políticas de redução da emissão de poluentes (Fameli e Assimakopoulos., 2015).

De forma a otimizar a recolha de resíduos na cidade de Nikea, Atenas (Grécia), Chalkias e Lasaridi (2009) utilizaram SIG de forma a otimizarem a rota com vista a redução do consumo de combustível, tempo de viagem e emissões, construindo dois cenários alternativos à situação atual. Ambos os cenários considerados, permitiram ao município diminuir o consumo de combustível, emissões e tempo de viagem (Chalkias e Lasaridi., 2009).

### **2.1.2. Ruído**

---

Vários estudos foram realizados e que consistiam na aplicação de SIG para a quantificação espaço-temporal do ruído.

O projeto DYNAMAP (*Dynamic Acoustic Mapping* – Desenvolvimento de sensores de baixo custo para monitorização de ruído em tempo real) tem o objetivo de desenvolver o mapeamento dinâmico de ruído com a capacidade de detetar e representar em tempo real o impacto acústico da infraestrutura rodoviária (Belluci et al., 2016, 2017). Pretende-se encontrar uma solução técnica que permita facilitar e baixar o custo da criação de mapas de ruído, através de um sistema de monitorização automático baseado em sensores customizáveis de baixo custo e um *software* próprio baseado em SIG, realizando atualizações em tempo real dos níveis de ruído. Um sistema foi testado na cidade de Roma e de Milão, em Itália, com características diferentes, uma porção da rede urbana e uma autoestrada, respetivamente (Bellucci et al., 2016, 2017).

As autoestradas junto de aglomerados habitacionais são uma grande fonte de poluição sonora para a população residente. Foi realizado um estudo para aferir o impacto que uma autoestrada que passa pela cidade de Adana (na Turquia) induz no centro da cidade, assim como aferir o rácio de pessoas afetadas. Foi concluído que 5% dos habitantes no centro da cidade de Adana estão expostos a valores de ruído durante o período diurno superiores a 68 dB (A) e cerca de 12,5% durante o período noturno estão expostos a valores superiores a 58 dB (A). Comparando o nível de ruído obtido neste estudo com os valores normalizados, conclui-se que os níveis de ruído a que os habitantes da cidade de Adana estão expostos são superiores aos recomendados (Çolakkadioğlu e Yücel., 2017).

Podem ser desenvolvidos mapas de ruído proveniente do tráfego rodoviário dados através da recolha de dados (posição e velocidade) de um GPS sendo automaticamente exportados para uma plataforma SIG. Cai et al., (2015) utilizaram esta metodologia para criarem um mapa de ruído da cidade de Guangzhou na China, através de uma relação que relaciona a velocidade com a densidade do tráfego que é utilizada para estimar o volume de tráfego, informação recolhida através de sistemas GPS. Entretanto a informação quanto à rede de estradas e presença de edifícios é automaticamente exportada para uma plataforma SIG. De seguida um modelo de emissão de ruído por veículo é combinado com um modelo de propagação do ruído de forma a obter os valores globais de ruído.

De forma a aliviar o congestionamento e tornar o transporte público mais fluído no centro da cidade de Dublin, foi criada uma restrição para que os veículos particulares não circulem em certas zonas sensíveis onde os congestionamentos são frequentes. Esta solução para além de aliviar o tráfego na zona, diminuir o tempo de viagem dos transportes públicos, também permitiu que existisse uma redução dos níveis de poluição sonora. Foram realizadas medições de ruído antes e após a implementação da medida e obteve-se uma redução de 2 dB(A) aos quais a população se encontrava exposta (King et al., 2011).

## **2.2. Impactes sociais**

---

Revisão bibliográfica no âmbito da aplicação de SIG no enquadramento dos impactes sociais (acidentes rodoviários e congestionamento).

### **2.2.1. Acidentes rodoviários**

---

O sucesso na previsão de acidentes rodoviários depende da análise cuidada e precisa de uma base de dados de acidentes rodoviários (Selvasofia e Arulraj., 2016), podendo um sistema SIG ser utilizado para armazenar espaço-temporalmente dados de acidentes de tráfego. Plataformas baseadas em SIG podem ser utilizadas como forma de identificar troços numa rede rodoviária de elevado risco de acidente, através do reconhecimento de padrões de acidentes rodoviários (Mohaymany et al., 2013).

Na Índia as principais vítimas mortais de acidentes rodoviários são os peões. Usando um sistema baseado em SIG, Rankavat e Tiwari (2016) identificaram quais as zonas na cidade de Deli onde existe uma maior incidência de acidentes envolvendo peões, cruzando esta

informação com dados da percepção do risco dos cidadãos recolhidos através de inquéritos, avaliando assim se a percepção dos mesmos se encontra correta (Rankavat e Tiwari, 2016).

Utentes vulneráveis como peões e ciclistas são os agentes mais vulneráveis aos acidentes rodoviários visto estarem mais expostos ao risco, sendo que metade das mortes que ocorrem devido a acidentes rodoviários são de utentes vulneráveis. A identificação de padrões e modelos de previsão baseados em SIG podem ser uma ferramenta crucial para melhorar a segurança rodoviária. Com base nesta premissa, Vilaça et al. (2017) realizam um estudo do ponto de vista espacial e temporal de forma a verificar os padrões existentes entre várias variáveis relacionadas com a segurança rodoviária, relacionado dados como a idade, o género, a gravidade dos ferimentos, o tipo de utente vulnerável, condições atmosféricas e o espaço temporal em que ocorrem os acidentes. Foi realizada a georreferenciação dos dados tendo sido possível identificar as zonas mais vulneráveis a acidentes rodoviários (Vilaça et al., 2017).

### **2.2.2. Congestionamento**

---

Com o aumento da densidade populacional nas cidades de todo o mundo, o volume de tráfego aumenta o que pode levar a congestionamentos de trânsito. O congestionamento do trânsito deteriora a qualidade do ar e fazem aumentar as emissões de CO<sub>2</sub>. Atualmente existem mecanismos de forma a minimizar o congestionamento como por exemplo a utilização eficiente de semáforos. No entanto esta solução apresenta algumas limitações pois não tem em conta as emissões provenientes dos veículos que se encontram em espera nem capacidade para lidar com acontecimentos não expectáveis como acidentes ou obras nas infraestruturas (Chrpa et al., 2015). Uma das soluções pode ser o planeamento automatizado para realizar o roteamento das melhores rotas a escolher tendo em conta a diminuição de impactes a nível da qualidade do ar, realizando dois objetivos, diminuir o tempo de espera dos veículos e diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana (Chrpa et al., 2015).

A utilização de dados de navegação disponíveis em várias plataformas como o Google Maps, TomTom, Bing Maps, entre outros podem ser uma boa ferramenta de forma a quantificar o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e de gases com efeito de estufa, podendo os mesmos dados ser utilizados, portanto para otimização de rotas. O congestionamento pode ser classificado de duas formas: congestionamento pontual e não expectável provocado por incidentes de tráfego ou trabalhos de construção na via, ou congestionamento regular, que ocorre a certos momentos do dia em algumas das vias de uma rede rodoviária. No caso de estudo realizado por Kellner (2016) através de dados de navegação, foi possível observar qual o impacte que o congestionamento regular apresentava nas emissões de CO<sub>2</sub>, tendo obtido como resultados um aumento que pode variar entre 2,5% a 50% (Kellner, 2016).

## 2.3. Exposição das populações

---

A poluição ambiental (poluentes atmosféricos e ruído) não interessa simplesmente como um dado absoluto. É também importante saber em que medida as populações são afetadas pela mesma, e se de forma diferenciada. Tendo em conta a densidade populacional de um local, um certo nível de emissões terá mais impacto em termos globais numa zona com maior densidade populacional do que numa zona com menor densidade populacional, sendo por isso importante ter em conta a quantidade de pessoas afetadas por um certo nível de poluição ambiental.

Kingham et al. (2013) estudaram numa pequena cidade da Nova Zelândia a exposição a poluentes atmosféricos a que os utilizadores de vários modos de transporte se encontram mais vulneráveis. Retiraram como conclusão que os utilizadores dos vários meios de transporte analisados estão expostos a níveis diferentes de poluição do ar. Utilizadores de veículo rodoviário particular estão mais expostos ao CO, ciclistas que circulam na estrada estão mais expostos à poluição atmosférica que ciclistas que circulam fora da rede de estradas, ocupantes de transportes públicos (como autocarros) estão mais expostos a partículas finas que ciclistas, e utilizadores que andam a pé estão expostos ocasionalmente a elevados níveis de poluição durante curtos períodos de tempo. Em termos absolutos os ocupantes de um veículo rodoviário são os utilizadores mais vulneráveis à poluição atmosférica (Kingham et al., 2013).

## 2.4. Quantificação de externalidades do setor dos transportes

---

Tal como discutido no capítulo 1 (1.1. Motivação), um sistema de transportes tem vários impactos associados, tendo cada um dos impactos um custo para a sociedade/ambiente, podendo estes ser chamados de custos externos do setor dos transportes. Devido à falta de informação pública acerca destes fatores, as externalidades associadas aos transportes não são frequentemente tidas em conta aquando da tomada de decisão quanto à rota a escolher por parte do utilizador, nem quanto ao planeamento público do sistema de transportes. A utilização dos custos externos do sistema de transportes como uma variável de ponderação, pode levar à mitigação dos impactos associados ao tráfego rodoviário (Korzhenevych et al., 2014, Quinet., 2004).

A quantificação do custo associado às externalidades do setor dos transportes baseia-se no conceito que os vários impactos associados ao tráfego rodoviário representam um custo para a sociedade/ambiente. A quantificação destes custos pode ser utilizada como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão e como um fator de ordenamento de território e mitigação de impactos. Estes custos poderão ser divididos em duas classes (Korzhenevych et al., 2014):

- **Custos sociais:** refletem os custos da degradação das infraestruturas, custos de capital, custos associados ao congestionamento, ruído, acidentes rodoviários e às emissões.
- **Custos privados:** diretamente suportados pelo utilizador, custos como impostos, taxas, gastos em combustível e manutenção do veículo.

A estimativa dos custos associados por norma é baseada numa abordagem *bottom-up* para casos de estudo mais específicos com a possibilidade de diferenciação por exemplo entre várias rotas. A abordagem *top-down* quantifica o custo numa perspetiva nacional e é útil para verificar a diferença entre os vários modos de transporte. O fator de custo associado aos impactes é obtido através de várias metodologias, estes podem ser quantificados através do preço de mercado que um certo efeito provocará como por exemplo o custo das reparações das várias infraestruturas que compõe uma rede rodoviária. Quantificação dos custos que, por exemplo impactes ambientais têm na saúde humana, como a cura de patologias associadas à exposição da população às emissões de poluentes ou o impacto que estes têm no meio ambiente, como a danificação de culturas agrícolas (Korzhenevych et al., 2014).

Vários trabalhos nesta questão têm sido realizados ao longo destes últimos anos. Cravioto et al. (2013) estudaram os custos externos associados aos impactes dos transportes no México. Chegou-se à conclusão que, da totalidade dos custos externos, 28% estão associados a acidentes rodoviários, 22% ao congestionamento, 21% aos gases com efeito de estufa, 13% à poluição do ar, 7% a problemas estruturais e 9% ao ruído. Anderson et al., (2016) sugere que 43% do custo total associado às externalidades no sistema de transportes se devem ao congestionamento, 18% a acidentes rodoviários, 17% a gases com efeito de estufa, 15% à poluição atmosférica, 6% às importações de petróleo e 1% ao ruído. Os custos associados aos vários impactes variam de país para país, dependendo de vários fatores como o parque automóvel, o PIB, características locais, condições do sistema de saúde, entre outros aspetos, por isso uma diferente distribuição relativa dos impactes é de se esperar.

## **2.5. Otimização de rota**

---

Informações de carácter ambiental/social podem ser utilizadas como critério na otimização de rota. A escolha de rota tem efeitos a nível do consumo de combustível e das emissões, podendo o conceito de otimização de rota, tendo como base impactes ambientais, ser uma importante ferramenta na mitigação dos impactes associados ao tráfego rodoviário (Ahn e Rakha., 2008).

Quando se cria ou utiliza um algoritmo de otimização de rota, não se deve ter como regra apenas a utilização de um fator ambiental como única variável de otimização de rota sendo importante também ter em conta fatores como o volume de tráfego e o número de indivíduos expostos em tempo real. Por norma, maior parte dos estudos realizados assumem que a rota que acarreta menores emissões é aquela que minimiza o valor total de emissões durante uma viagem. No nível de emissões pode variar num fator de 1,4 enquanto que o potencial número de indivíduos expostos pode variar num fator de 10 (Bandeira et al., 2016a).

Um estudo recente explorou várias estratégias de eco-navegação para variados tipos de trajeto (Bandeira et al., 2017). O estudo demonstra que ao orientar o tráfego de forma a



minimizar os impactos ambientais, os danos ambientais podem ser reduzidos cerca de 9%, tendo uma influência praticamente marginal em termos de tempo de viagem. No entanto em certas situações, caso os condutores sejam aconselhados individualmente com base na sua própria minimização de emissões, as emissões totais do sistema poderão aumentar, pelo facto que o algoritmo de navegação utilizado pode levar ao desvio de condutores para uma rota com menor capacidade. Caso os condutores sejam orientados com base na minimização do tempo de viagem, também leva a que as emissões totais do sistema aumentem, pois os condutores são desviados para uma rota de maior capacidade. Estes dois casos fazem com que o impacto causado pelos veículos que são desviados, consoante a minimização de emissões ou/e tempo de viagem, aumentem, devido ao impacto que o veículo desviado tem nos restantes veículos que já circulavam nessa mesma rota. É sugerido que nestas circunstâncias específicas, a informação individual apenas deve ser dada aos condutores quando as poupanças realizadas pelo veículo superem o total de aumento potencial causado pelos restantes veículos (Bandeira et al., 2017).

Com o objetivo de prever as emissões de CO<sub>2</sub> para 4 rotas consideradas para uma certa viagem, averiguando qual das rotas acarreta menores emissões, avaliando também o impacto que esta tem no tempo de viagem, foi observado que ao ser utilizada a rota mais ecológica, é possível diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> sem afetar significativamente o tempo de viagem, conseguindo-se uma redução de cerca de 10% dos níveis de CO<sub>2</sub> em relação à rota mais rápida (Zeng et al., 2016).

Bandeira et al., (2016b) aplica o conceito de externalidades do setor dos transportes, onde são utilizados os custos externos associados a vários impactos, como as emissões, o ruído, tempo de viagem, utilização de combustível, conflitos rodoviários e exposição dos peões aos impactos, para criar um indicador associado a um veículo que permita analisar 4 rotas diferentes para uma viagem.

Os impactos associados ao tráfego rodoviário podem ser minorados através de um sistema de otimização das portagens, Roman e Ritchie (2017) concebem um algoritmo de otimização de localização de portagens de forma a diminuir a exposição das populações aos vários impactos relacionados com o sistema de transportes.

Em suma, o conceito da utilização do custeamento de segmentos de uma rede urbana ainda se encontra numa forma embrionária, apesar de já existirem vários estudos que utilizam os custos sociais de forma a otimizar uma viagem. No entanto os estudos desenvolvidos nesta área centram-se mais em casos específicos de elevado detalhe que impossibilita a sua aplicação numa escala maior, sendo este um dos objetivos a ser testado nesta dissertação (a aplicabilidade do custeamento de segmentos de rede para otimização de rota numa rede rodoviária urbana numa mesoescala).



### 3. Metodologia

Nos próximos subcapítulos será apresentada a metodologia aplicada para a criação da plataforma.

Como alvo de estudo foi considerada uma parte da rede rodoviária urbana de Aveiro, exemplificada na figura 8. Foi considerada esta zona de estudo devido aos dados existentes e porque nesta zona de estudo se encontram vias de diferentes características, como por exemplo vias com maior velocidade de circulação (como a EN 109) e vias com limite de velocidade inferior (como as várias ruas residenciais) que compõe a rede em estudo. Também nesta zona de estudo se encontram vários tipos de ambiente envolvente como áreas residenciais, zonas mais sensíveis com troços a passar perto de escolas e áreas onde é comum haver um nível elevado de turismo, existindo também zonas onde praticamente não há habitações na zona envolvente da via.

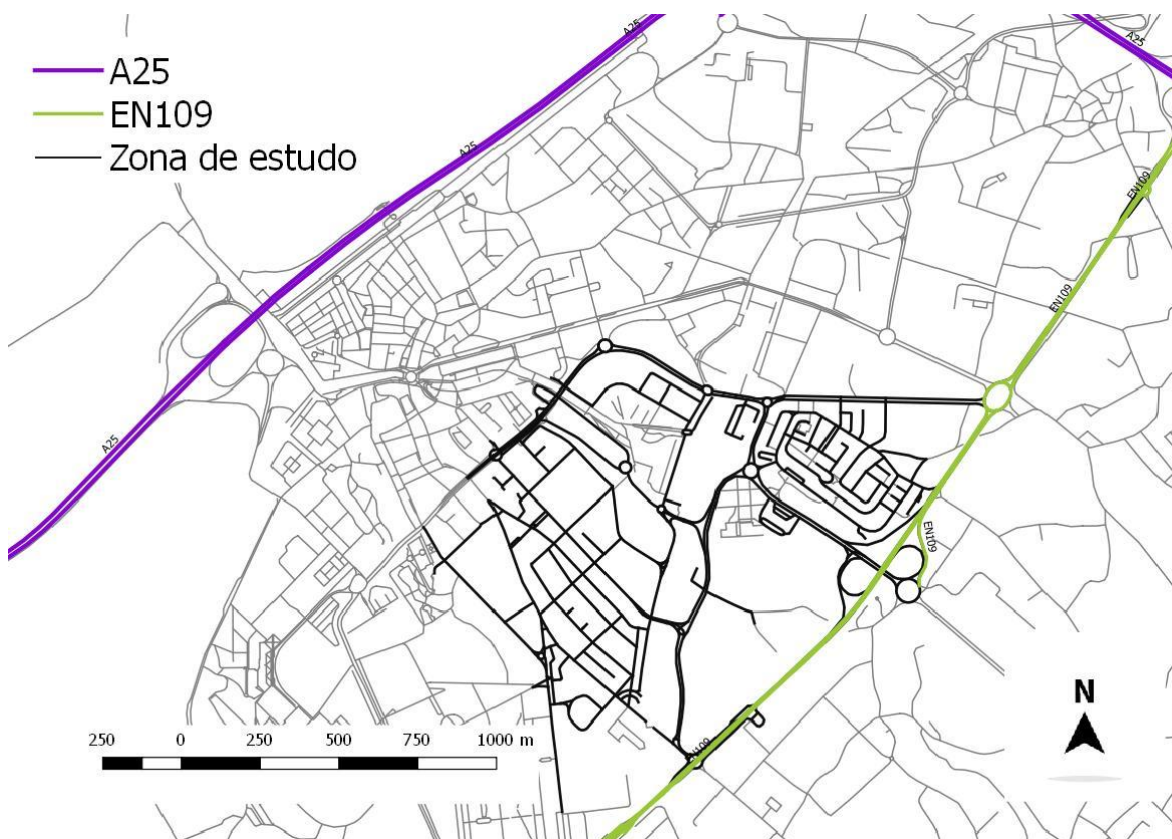


Figura 8 - Representação da rede rodoviária de Aveiro e qual a zona que foi alvo de estudo.

A zona de estudo compreende os troços, inclusive, entre a EN 109 e a Avenida 5 de Outubro e entre a Alameda Silva Rocha + Avenida Central + Avenida Congresso Oposição Democrática e as ruas de Aires Barbosa e São Sebastião.

### 3.1. Cronograma e fluxograma

---

A realização desta dissertação foi dividida em várias tarefas:

- **Tarefa 1** - Revisão bibliográfica sobre vulnerabilidades decorrentes dos impactes dos sistemas de transporte rodoviários;
- **Tarefa 2** - Recolha/análise de dados;
- **Tarefa 3** - Desenvolvimento da ferramenta de mapeamento;
- **Tarefa 4** - Testes ao sistema desenvolvido;
- **Tarefa 5** - Escrita da dissertação.

De acordo com o seguinte cronograma (figura 9).

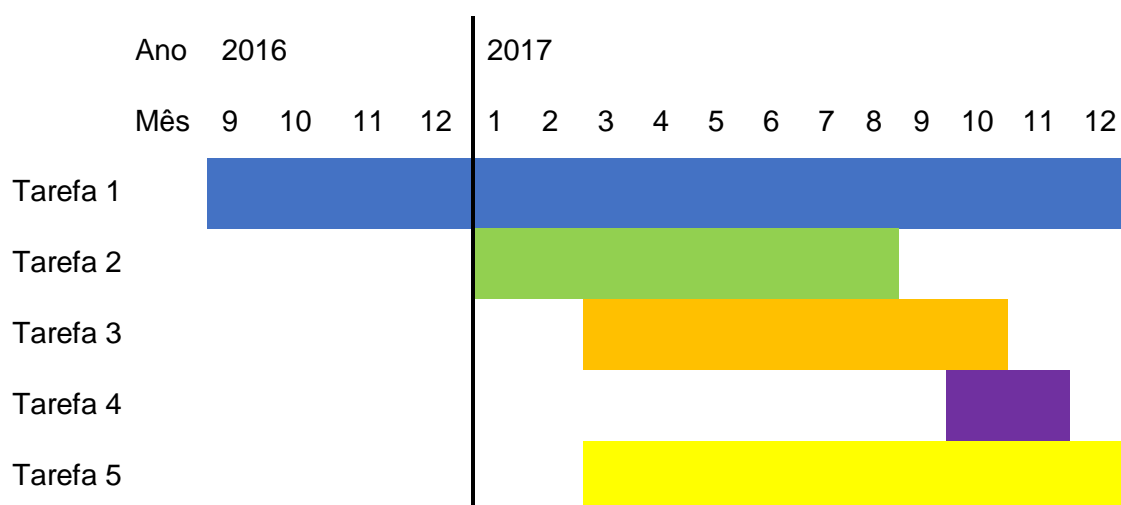


Figura 9 - Cronograma das tarefas realizadas ao longo da dissertação.

O desenvolvimento da plataforma evoluiu segundo as fases apresentadas na figura 10. Pretende-se o desenvolvimento de uma plataforma com estruturas funcionais flexíveis e adaptáveis à disponibilidade de dados e equipamentos de monitorização da infraestrutura. Foram consideradas duas metodologias de recolha de dados para estimar as emissões e o ruído:

- Dinâmica de veículos, sendo as emissões tratadas no MATLAB por via da metodologia VSP (potência específica do veículo) (Zhai., 2007), onde é utilizada a velocidade instantânea do veículo, e usando a metodologia de Lelong (adaptado) (Bandeira et al., 2016b) para estimar o ruído (através da velocidade média). Futuramente a dinâmica de veículos poderá ser útil num cenário de veículos conectados utilizando dados recolhidos através de *floating car data*.
- Para suprir casos onde exista falta de informação foi considerada outra metodologia que consiste na modelação de um veículo típico através do modelo COPERT (através de dados da frota portuguesa e quilómetros percorridos por cada tipo de veículo) e retiradas retas de regressão para cálculo das emissões e usado o método de Lelong (adaptado) para estimar o ruído. Futuramente, o modelo COPERT pode ser usado para suprir os casos de falta de informação ou quando se tem por

exemplo apenas sensores fixos (como radares de velocidade), leitores de matrícula que calculam o tempo de viagem, entre outros.

Os dados obtidos, após tratamento, foram inseridos no QGIS.

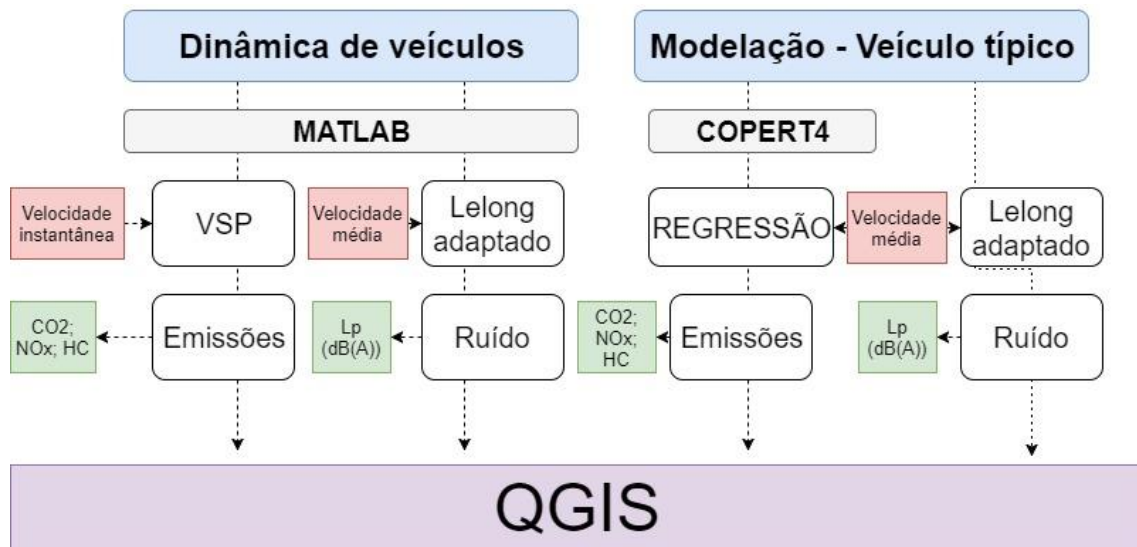


Figura 10 - Fluxograma do desenvolvimento da plataforma. Lp – Nível de propagação sonora.

### 3.2. Recolha de dados

Foram utilizados dois métodos para calcular as emissões de poluentes e o ruído para a rede em estudo. Os dados relativos aos acidentes entre veículos e utentes vulneráveis foram disponibilizados pela ASNR.

O primeiro método, consiste na aquisição de dados de velocidade instantânea, acelerações e desacelerações, metodologia denominada de dinâmica de veículos. No segundo método foram aplicadas velocidades médias em cada troço tendo como base as recomendações de OSM (2017) (tabela 2). Na figura 11 encontram-se representados os troços que foram alvos de medições.

A «Rota 1» compreende os troços entre a rotunda da Oita e a rotunda da Esgueira. A «Rota 2» abrange os troços entre a rotunda anexa à estrada de Vilar e a rotunda anexa à alameda Silva Rocha. A «Rota 3» inclui os troços entre a rotunda da Sé e a rotunda da linha superior norte. A «Rota 4» abrange os troços entre a rotunda da Sé e a rotunda da Oita. A todos os outros troços não identificados foi aplicado o segundo método (velocidade média).

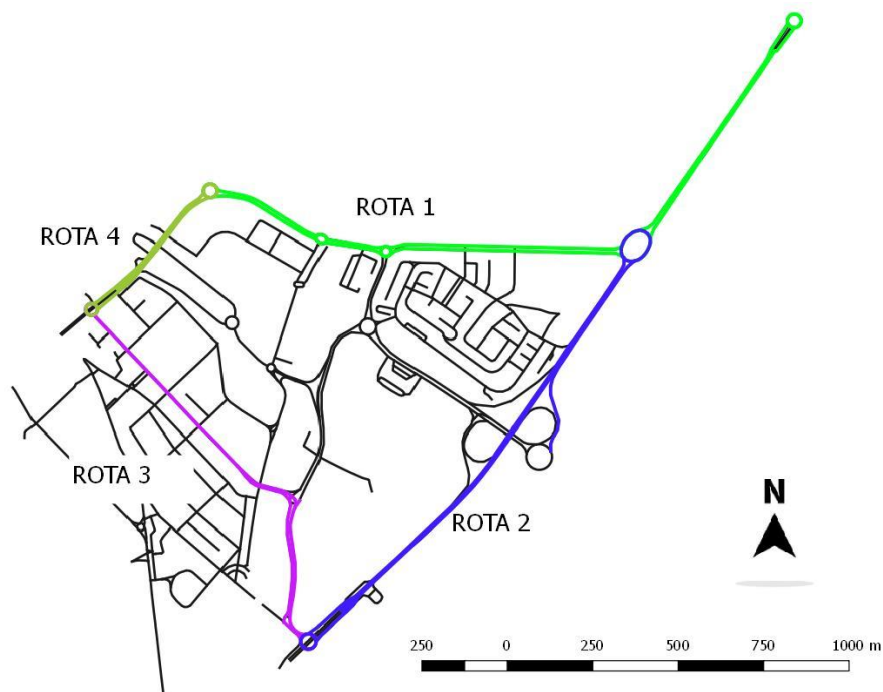


Figura 11 - Representação dos troços alvo de medições.

Tabela 2 - Velocidades consideradas para os troços onde não foram utilizados dados de dinâmica de veículos OSM (2017). Velocidade média para um veículo em regime *free flow*.

Tipologia	Velocidade média (km/h)	Descrição
<b>Trunk</b>	70	Troços pertencentes a por exemplo estradas nacionais como a EN 109.
<b>Primary/secondary/tertiary</b>	40	Conexões entre vilas, cidades. Em centros urbanos varia entre os 30 e os 50 km/h.
<b>Links</b>	15	Entradas e saídas entre diferentes troços.
<b>Residential</b>	25	Ruas residenciais.
<b>Service</b>	10	Parques de estacionamento.

Utilizou-se a plataforma OSM (Open Street Maps) devido à facilidade em retirar informação da mesma e ser compatível com o QGIS.

### 3.3. Quantificação de emissões de poluentes

---

O cálculo das emissões associadas a cada troço foi obtido por dois processos diferentes, subjacentes ao método de recolha de dados. No caso do primeiro método foi utilizado um modelo de emissões, o VSP (Potência Específica do Veículo). No segundo método foram utilizadas as curvas de regressão com base no modelo COPERT.

O VSP tem como vantagem a sua precisão e a possibilidade de ser replicado com veículos conectados através de *floating car data*, tendo como desvantagens ser mais pesado em termos de processamento e uma menor capacidade de representar frota local.

Com o modelo COPERT tem-se uma maior capacidade de representação da composição da frota e o seu processamento é mais simples. No entanto, não consegue representar corretamente variações de velocidade (a velocidade média pode ser a mesma, mas pode ter padrões de aceleração distintos).

#### 3.3.1. Método VSP

---

A dinâmica de veículos consiste em praticar condução real durante um certo período de tempo e uma rota pré-definida, sendo feitos registos segundo a segundo da localização e da velocidade instantânea do veículo com recurso a um sistema GNSS.

Os dados para a realização dos cálculos das emissões associadas são obtidos através da medição de dinâmica de veículos para uma rota pré-definida. As emissões são estimadas através de uma metodologia de emissões, baseada no conceito de VSP (*Vehicle Specific Power*) (Zhai., 2007), que é construído tendo como base retas de regressão que permitem a caracterização da atividade de um veículo num espaço temporal de segundo a segundo:

$$VSP = v \times (a + g \times \sin(\emptyset) + \psi) + \xi \times v^3 \quad (1)$$

Onde:

- $v$  = velocidade do veículo ( $\text{m.s}^{-1}$ ).
- $a$  = aceleração ( $\text{m.s}^{-2}$ ).
- $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m.s}^{-2}$ ).
- $\emptyset$  = inclinação.
- $\psi$  = resistência dos rolamentos.
- $\xi$  = coeficiente de arrastamento.

Os cálculos são realizados para 3 poluentes, tendo em conta se o veículo é a *diesel* ou a gasolina, sendo os poluentes:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , NMVOC, obtendo assim os valores para estes poluentes para cada segundo. Aquando da sua importação para o QGIS, os dados têm o seguinte aspeto exposto na figura 12.

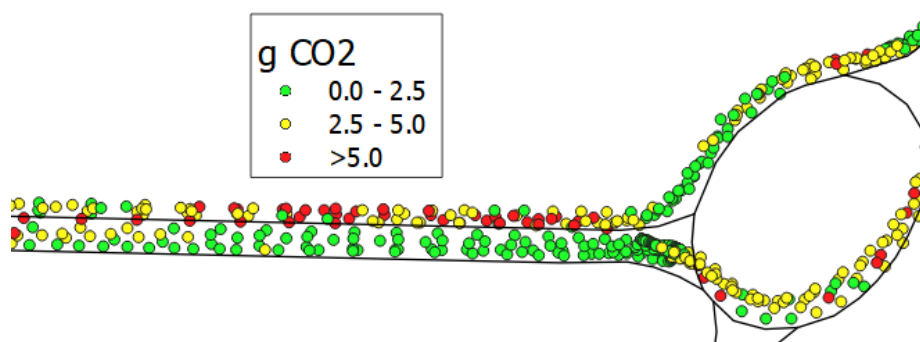


Figura 12 - Emissões de CO<sub>2</sub> segundo a segundo.

Cada ponto corresponde à quantidade de emissões expressa em g/s. Na figura 12 é possível verificar que temos vários pontos sobrepostos que correspondem às várias passagens realizadas durante as medições. O objetivo é ter associado a cada segmento da rede as suas emissões correspondentes. Com a adaptação de um *script* criado no MATLAB por Teixeira (2016), utilizando como critério a longitude e a latitude de cada segmento de rede procede-se à soma das emissões correspondentes, identificando as várias passagens utilizando como critério o tempo e a sua direção através da subtração da longitude<sup>n+1</sup> – longitude<sup>n</sup> ou latitude<sup>n+1</sup> – latitude.

Após a obtenção de, por exemplo  $n$  passagens, para um segmento da rede em estudo  $i$  procede-se para o cálculo da média das  $n$  corridas identificadas e realiza-se a sua importação para o QGIS. Dessa forma no QGIS a informação encontra-se em formato de linha e não de ponto tal como pretendido, como é possível ver na figura 13.

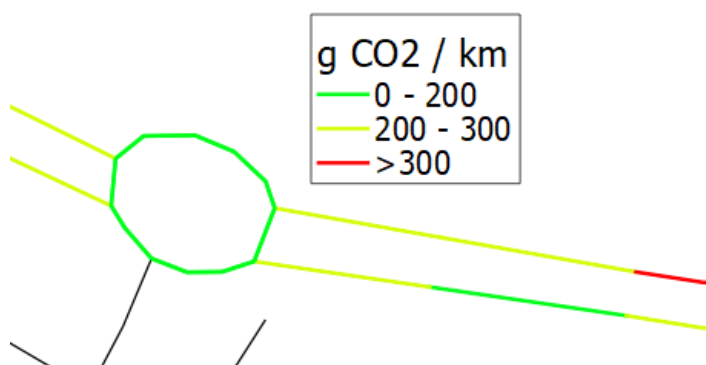


Figura 13 - Exemplificação de como se encontram os dados após tratamento da média das somas das emissões por segmento.

É possível verificar que nesta fase, as emissões já se encontram associadas ao seu segmento de rede correspondente.

As emissões de NO<sub>x</sub> expressam-se como NO.



### 3.3.2. Equações de regressão

---

A metodologia que utiliza equações de regressão consiste em utilizar os dados da frota portuguesa, disponibilizados pelo grupo de investigação *Transportation Technology* do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro que compreendem os dados do parque automóvel nacional e a sua quilometragem anual (anexo 7.1 e 7.2). Estes dados devem ser importados para o COPERT4 e estimam-se as emissões totais em Portugal para veículos a *diesel* e a gasolina tendo em conta várias velocidades, para posteriormente serem obtidas retas de regressão para os poluentes considerados de um veículo típico da frota portuguesa. Sendo o processo de cálculo o seguinte:

- Modelação das emissões totais para a frota portuguesa a várias velocidades em condução urbana utilizando o COPERT4 (toneladas de emissões para o total da frota portuguesa anualmente);
- Somatório do produto entre a população de cada veículo e a sua quilometragem anual para as velocidades consideradas.

$$vkmt = \sum \text{População (nº de veículos)} \times \text{Quilometragem anual} \left( \frac{km}{ano} \right)$$

- Divisão entre as emissões totais e o produto entre a população de cada veículo e a sua quilometragem anual.

$$\frac{g \text{ poluente}}{km} = \frac{\sum \text{ton. poluente} \times \text{nº veículos} \times \text{ano}}{vkmt} \times 10^6$$

- Obtenção das curvas de regressão.

$$\frac{g \text{ poluente}}{km} = a \times \text{velocidade}^2 + b \times \text{velocidade} + c$$

Realizar este processo para cada poluente considerado.

As equações de regressão obtidas (tabela 3) têm como variável independente a velocidade, e foram aplicadas aos troços onde não foi possível obter dados de dinâmica de veículos, neste caso foram assumidas velocidades médias tendo como base as recomendações de OSM (2017) (tabela 2).

Tabela 3 - Equações e coeficiente de regressão para os poluentes considerados e respetiva tecnologia onde v representa a velocidade. Velocidade em km/h.

Poluente	Tecnologia	Equação	R <sup>2</sup>	p-value
<b>g CO<sub>2</sub>/km</b>	<i>Diesel</i>	$0,0456v^2-5,712v+332,44$	0,9856	0,000030
	Gasolina	$0,0465v^2-5,9451v+340,29$	0,9902	0,000060
<b>g NO<sub>x</sub>/km</b>	<i>Diesel</i>	$0,0002v^2-0,0229v+1,2698$	0,9919	0,000018
	Gasolina	$2*10^{-6}v^3+0,0003v^2+0,0104v+0,149$	0,7056	0,008646
<b>g NMVOC/km</b>	<i>Diesel</i>	$2*10^{-5}v^2-0,0021v+0,0899$	0,9910	0,000001
	Gasolina	$0,0002v^2-0,0199v+0,8539$	0,9955	0,002254

$p\text{-value} < 0,05$  para todas as equações, consideram-se as correlações estatisticamente significativas.

Estima-se, portanto, o valor de  $\frac{m_{poluente}}{L}$  através da velocidade.

Tendo o valor de  $\frac{m_{poluente}}{L}$  assim como o comprimento de cada segmento da rede, fazendo:

- $m_{poluente} = \frac{m_{poluente}}{L} \times L$  onde,

$m_{poluente}$  = massa correspondente a cada poluente (g)

$L$  = comprimento de um segmento da rede (km)

Estima-se o valor de emissões associadas a cada segmento da rede.

As curvas obtidas para veículos *diesel* e gasolina encontram-se nas figuras 14 e 15. As equações apenas são significativas na gama de velocidades a que estas foram modeladas.

As emissões de NO<sub>x</sub> consistem em emissões de NO e de NO<sub>2</sub>, enquanto que as emissões de NMVOC consistem nas emissões de VOC menos CH<sub>4</sub> (EEA., 2016c).

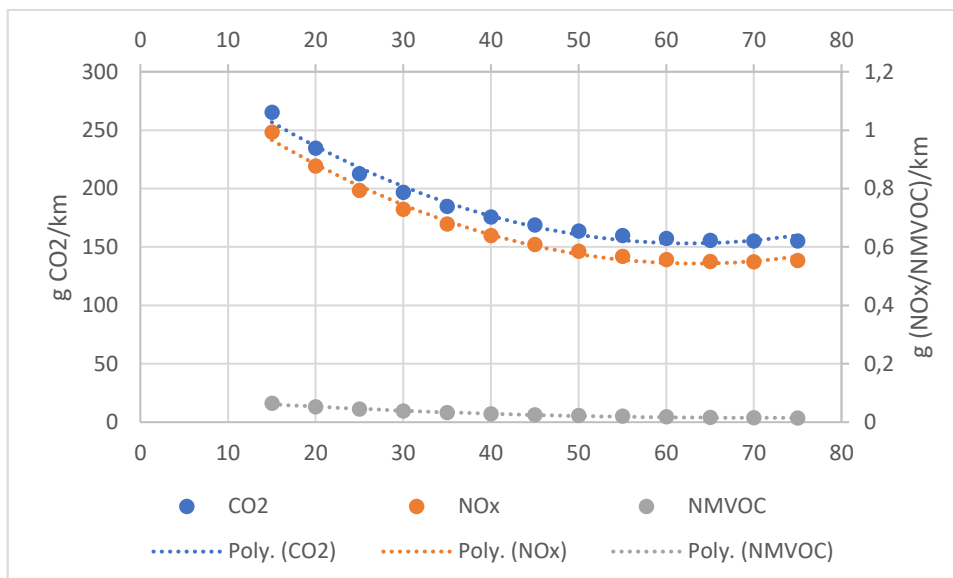


Figura 14 - Curvas obtidas para veículos *diesel*.

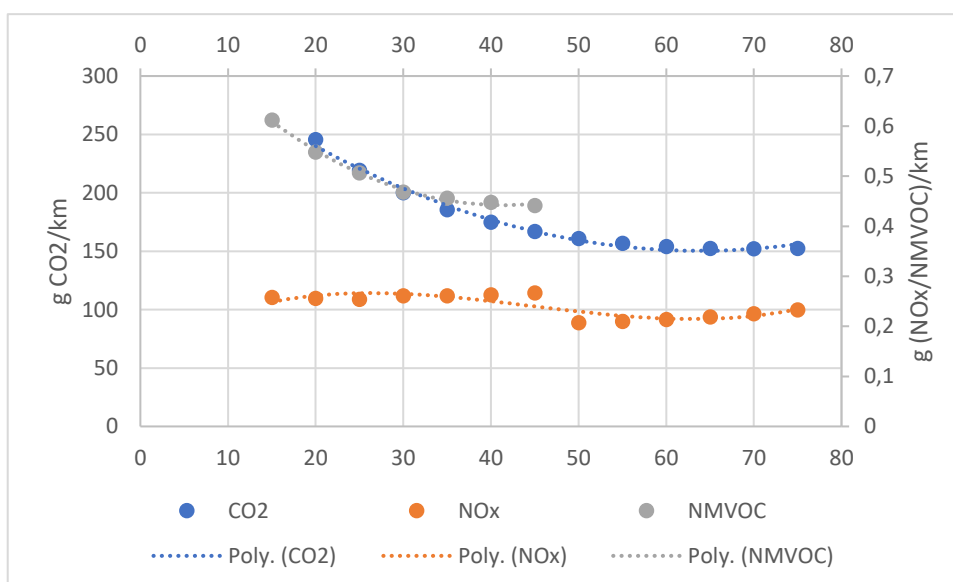


Figura 15 - Curvas obtidas para veículos gasolina.

### 3.4. Ruído

A modelação do nível de ruído é mais comum para um conjunto de veículos, com uma localização espaço-temporal definida. Neste caso o interesse prende-se no cálculo do ruído produzido por apenas um veículo em cada segmento da rede em estudo, tendo-se optado pela abordagem de Lelong. Para isso numa primeira fase calcula-se o valor médio do nível de potência sonora da fonte para estado de aceleração e desaceleração do veículo e de seguida a propagação do som a uma distância fixa do veículo (Bandeira et al., 2016b).

Segue-se, portanto, o seguinte procedimento:

$$\bullet \quad acc|dcc \text{ state} = \begin{cases} \alpha + \beta \times \log(v), & v > 11,5 \text{ km/h} \\ 82, & v < 11,5 \text{ km/h} \end{cases} \quad (1)$$

Com  $\alpha = 53,6 \pm 0,3 \text{ dB(A)}$  e  $\beta = 26,8 \pm 0,2 \text{ dB(A)}$ .

No caso de um estado de aceleração, para valores inferiores a 25 km/h, o nível sonoro é de 90,5 dB(A).

- De seguida,

$$W \text{ acc|dcc} = 10^{\frac{acc|dcc \text{ state}}{10}} \quad (2)$$

O cálculo de  $W \text{ acc|dcc}$  é realizado para todos os segundos, calcula-se então a média para o conjunto de pontos relacionados com a corrida alvo de estudo.

- Segue-se, portanto, o cálculo do nível de potência sonora ( $L_W$ ),

$$L_W = 10 \times \log(W \text{ acc|dcc}) \quad (3)$$

O valor de propagação assumido é de cerca de 7,5 m.

- Calcula-se finalmente o valor da propagação da fonte a uma distância fixa ( $L_p$ ),

$$L_p = L_W - 20 \log(7,5) - 8 \quad (4)$$

Devido à quantidade de dados, estudou-se uma forma de simplificação que não alterasse a precisão do método, em vez de se calcular o valor médio de  $W \text{ acc|dcc}$ , utiliza-se o valor de velocidade média para o cálculo do  $W \text{ acc|dcc}$ , tendo sido também desprezado o fenómeno de aceleração até aos 25 km/h. O método consiste em (Bandeira et al., 2016b):

- Cálculo da velocidade média entre as corridas consideradas.
- Cálculo  $acc|dcc \text{ state}$ :

$$acc|dcc \text{ state} = \begin{cases} \alpha + \beta \times \log(\bar{v}), & \bar{v} > 11,5 \text{ km/h} \\ 82, & \bar{v} < 11,5 \text{ km/h} \end{cases} \quad (5)$$

Com  $\alpha = 53,6 \pm 0,3 \text{ dB(A)}$  e  $\beta = 26,8 \pm 0,2 \text{ dB(A)}$ . Sendo  $\bar{v}$  a velocidade média.

- De seguida calcula-se o valor de  $W \text{ acc|dcc}$ ,

$$W \text{ acc|dcc} = 10^{\frac{acc|dcc \text{ state}}{10}} \quad (6)$$

- Calcula-se o nível de potência sonora ( $L_W$ ),

$$L_W = 10 \times \log(W \text{ acc|dcc}) \quad (7)$$

- Tendo por fim o nível de propagação sonora ( $L_p$ ) a uma distância de 7,5 m,

$$L_p = L_W - 20 \log(7,5) - 8 \quad (8)$$

Foi realizado um estudo para verificar a discrepância entre utilizar a velocidade instantânea e a velocidade média para alguns segmentos da rede em estudo, tendo sido obtidos os seguintes resultados expostos na seguinte figura 16 e tabela 4.

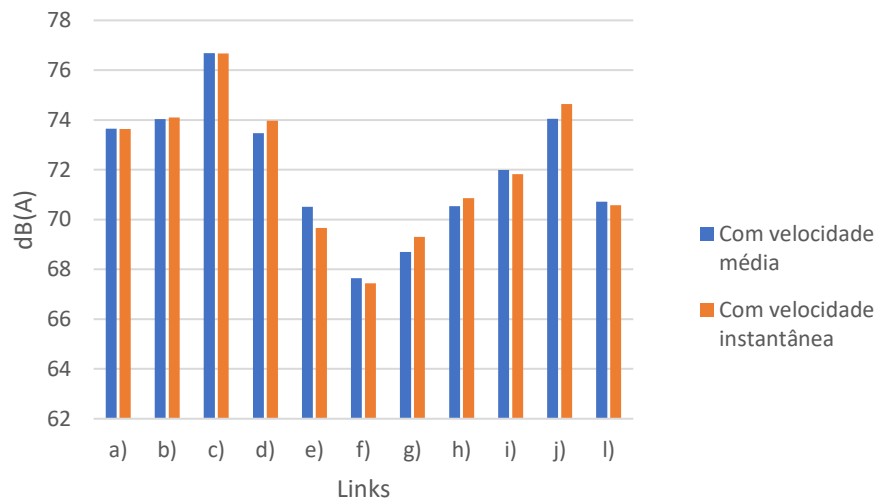


Figura 16 - Discrepância do nível sonoro de propagação por veículo entre o método de usar velocidade instantânea e usar velocidade média.

Como é possível verificar na figura 16 o nível de discrepância é pouco significativo. Na tabela seguinte é possível verificar os valores de discrepância percentuais e absolutos.

Os links identificados como a), b), c) e d) pertencem à EN 109, com o link a) e b) a serem no sentido Norte – Sul e os links c) e d) no sentido Sul – Norte. Os links e), f), g) e h) pertencem à Av. 5 de Outubro, todos no sentido Sul – Norte. Os links i) e l) pertencem à Av. 25 de Abril com i) no sentido Este – Oeste e l) no sentido Oeste – Este. Por fim o link j) pertence à R. Borges, sentido Norte- Sul.

Tabela 4 - Valores absolutos e percentuais da discrepância na utilização dos dois métodos.

Link	Diferença absoluta (dB(A))	Diferença percentual (%)
a)	0,01	0,02
b)	0,07	0,09
c)	0,02	0,02
d)	0,50	0,68
e)	0,85	1,20
f)	0,21	0,31
g)	0,60	0,87
h)	0,33	0,47
i)	0,16	0,23
j)	0,59	0,79
l)	0,14	0,20

Como é possível verificar na tabela 4 a discrepância é mínima sendo o valor mais alto cerca de 0,85 dB(A) e 1,20%.

Desta forma é possível estimar o nível de propagação sonoro para todos os segmentos de forma prática e com uma boa precisão. De salientar que ao longo de todo o processo de cálculo, um fator associado ao tipo de pavimento não entra em qualquer parte do procedimento e este poderá ter influência nos níveis de propagação sonoros.

### 3.5. Cálculo dos custos marginais das externalidades

Como descrito anteriormente no subcapítulo 2.4 – Quantificação de externalidades do setor dos transportes, os impactes recorrentes do tráfego rodoviário acarretam custos sociais/ambientais. Neste caso, após quantificação do CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC e ruído procedeu-se ao cálculo dos seus custos associados.

Como forma de contabilização dos impactes das emissões de poluentes foi utilizado o documento “*Update of the Handbook on External Costs of Transport*” (Korzhenevych et al., 2014) onde é sugerido que sejam aplicados os seguintes fatores expostos na tabela 5.

Tabela 5 - Fatores associados a vários poluentes recorrentes do tráfego rodoviário para Portugal (Korzhenevych et al., (2014))

Poluente	Fator
CO <sub>2</sub>	90 €/ton. CO <sub>2</sub>
NO <sub>x</sub>	1957 €/ton. NO <sub>x</sub>
NMVOC	1048 €/ton. NMVOC
PM <sub>2,5</sub>	196335 €/ton. PM <sub>2,5</sub>
SO <sub>2</sub>	4950 €/ ton. SO <sub>2</sub>

Neste caso de estudo, devido a não ser possível quantificar as emissões de PM<sub>2,5</sub> e de SO<sub>2</sub> através do VSP, os custos associados a estes serão desprezados. O SO<sub>2</sub> não é significativo no setor dos transportes, das emissões totais de SO<sub>2</sub> em Portugal, o setor dos transportes é responsável por um valor perto dos 0%. No caso das PM<sub>2,5</sub> o setor dos transportes rodoviários é responsável por perto dos 7% das emissões totais deste poluente (EEA., 2014), poderá futuramente ser importante avaliar o impacte que as mesmas terão no cálculo dos custos marginais das externalidades.

De forma a quantificar os custos associados ao ruído, foram estudadas duas metodologias, uma proposta por Le Maître (2015) e outra por VTPI (2012).

Na primeira abordagem, dados como a população afetada e o volume de tráfego horário são necessários (Le Maître., 2015):

- O custo social do ruído é obtido através do produto entre o número de indivíduos expostos ao ruído (a uma distância de 7,5m da fonte) e um fator em €/dB por pessoa exposta por ano.

$$custo\ total = \sum_i custo\ t(L_i) \times pop_i$$

Onde *custo* é o custo em função do nível de ruído obtido para uma frota de veículos ( $L_i$ ) e  $pop_i$  o número de pessoas afetadas.

- Como o interesse neste caso de estudo é obter o custo associado a apenas um veículo, sugere-se dividir o *custo total* pela frota de veículos considerada no cálculo do ruído.

A abordagem de VTPI (2012) consiste em aplicar um fator de custo ao ruído associado aos quilómetros de cada *link*.

- $custo = 0,013\$ \times veículos \times milha$

Que traduzido para € e quilómetros,

- $\text{custo} = 0,0072\text{€} \times \text{veículos} \times \text{quilómetro}$

A primeira metodologia aplica-se mais a casos de estudo circunscritos a uma pequena área onde facilmente é contabilizado ou estimado sem grande erro o número de pessoas afetadas assim como o volume de tráfego. Devido ao presente caso de estudo ser aplicado a uma rede alargada optou-se pela utilização da abordagem proposta por VTPI (2012).

### 3.6. Exposição das populações

Apesar de ser praticamente impossível determinar com rigor o número de pessoas afetadas pelos impactes recorrentes do tráfego rodoviário numa rede rodoviária tão alargada, este fator não deve ser desprezado, sendo este bastante importante devido à natureza dos impactes considerados, tirando o CO<sub>2</sub>, terem o seu maior impacte a nível local (Bandeira et al., 2016b). Foi então estudada uma abordagem preliminar para incluir esta variável na contabilização dos custos sociais associados aos transportes.

Foi aplicado um fator tendo em conta a urbanização em volta da rede rodoviária urbana de Aveiro tendo em consideração também as zonas sensíveis como escolas, hospitais e zonas de turismo. Na tabela 6 especificam-se os valores para estes fatores de correção, bem como a sua descrição. Na figura 17 é possível verificar em qual dos troços foi aplicado este fator.

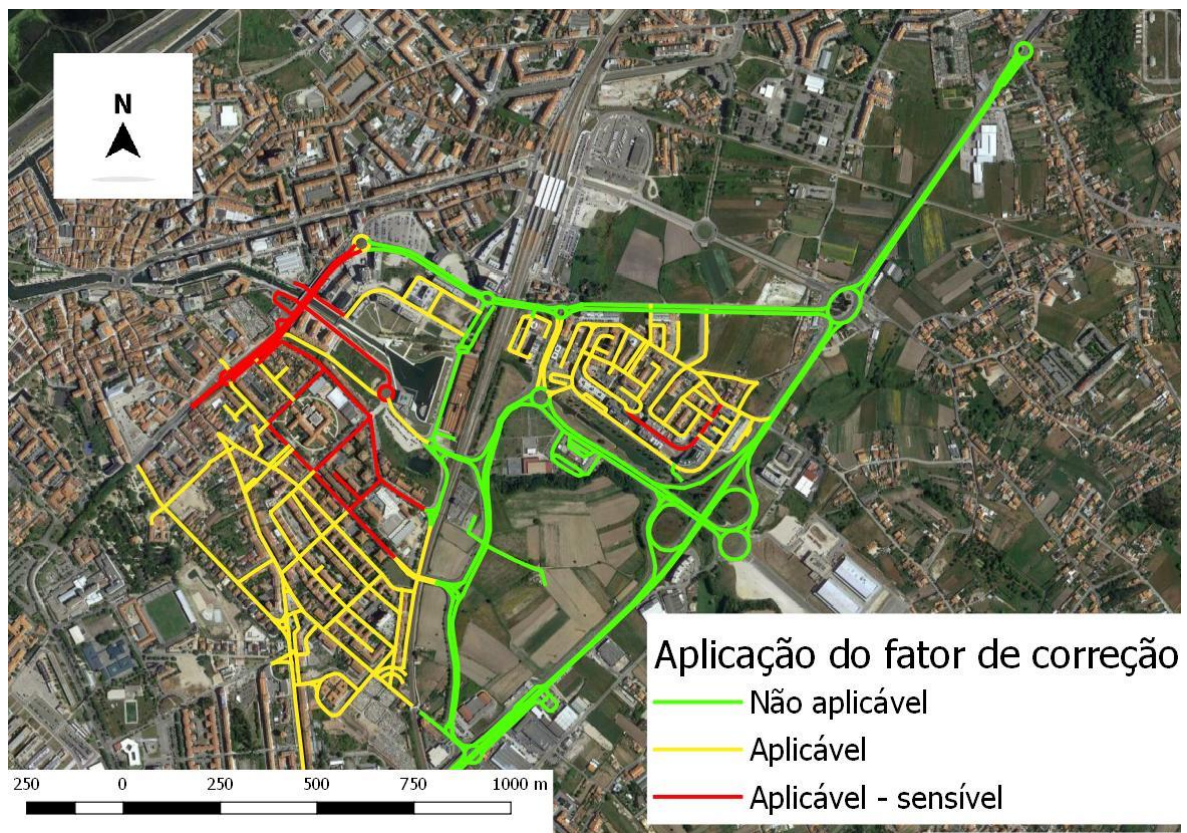


Figura 17 - Aplicação do fator de correção à zona de estudo.



Tabela 6 - Fatores de correção aplicados.

Aplicação	Fator de correção	Observação
Não aplicável	+0%	Zonas onde não existem aglomerados populacionais num alcance de 7,5m.
Aplicável	+30%	Zonas onde existem aglomerados populacionais num alcance de 7,5m.
Aplicável - sensível	+60%	Zonas onde existem estabelecimentos de ensino, hospitais e zonas turísticas num alcance de 7,5m.

Estes valores foram obtidos recorrendo a uma análise de sensibilidade, sabendo de antemão que os valores necessitariam de calibração futura. O fator de correção aplicado é uma forma de demonstrar de uma forma teórica o problema de maneira a verificar em que medida é que este fator afetará os resultados finais. Existe neste momento um projeto em execução financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (@CRUiSE) onde se estão a desenvolver mecanismos de visão artificial, sistemas de *crowdsourcing*, que permitirão ajustar estes fatores de forma dinâmica (@CRUiSE, 2017). De notar que o fator de correção é apenas aplicado ao NO<sub>x</sub>, NMVOC e ruído, não sendo aplicado ao CO<sub>2</sub> pois a emissão deste poluente não tem impactes significativos para a população local.

### 3.7. Teste à plataforma

De forma a aferir a utilidade dos dados recolhidos, foram realizados dois problemas de otimização de rota. No primeiro com o objetivo de verificar qual das rotas representa menores emissões e custos, assim como verificar a influência do fator associado à exposição das populações, e no segundo para aferir a influência que um fator associado ao congestionamento poderá ter.

#### 3.7.1. Problema de otimização de rota 1

Escolheu-se uma viagem que tentasse abranger grande parte dos troços que compõe o caso de estudo. A viagem escolhida tem início na EN 109 e tem como destino a Escola Secundária José Estêvão (figura 18).

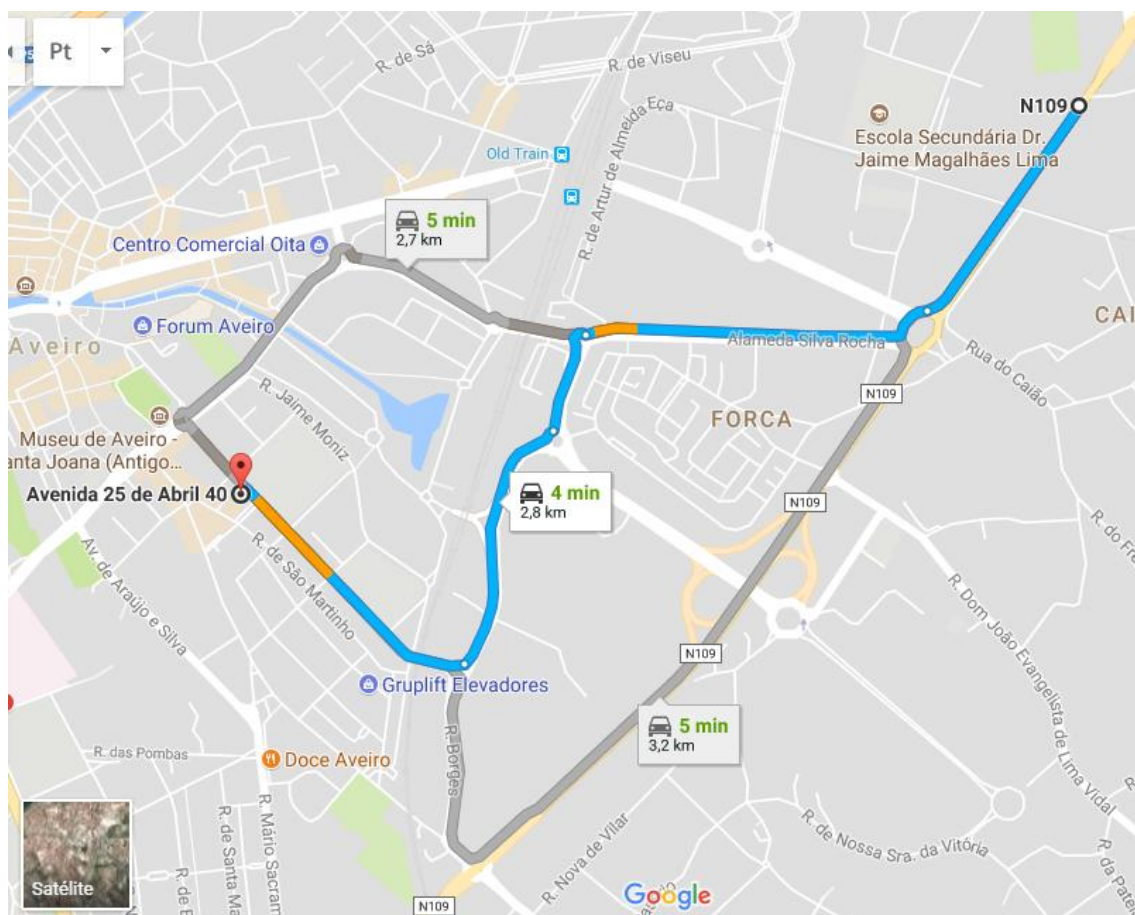


Figura 18 - Rotas fornecidas pelo Google Maps para a viagem considerada (Google Maps., 2017).

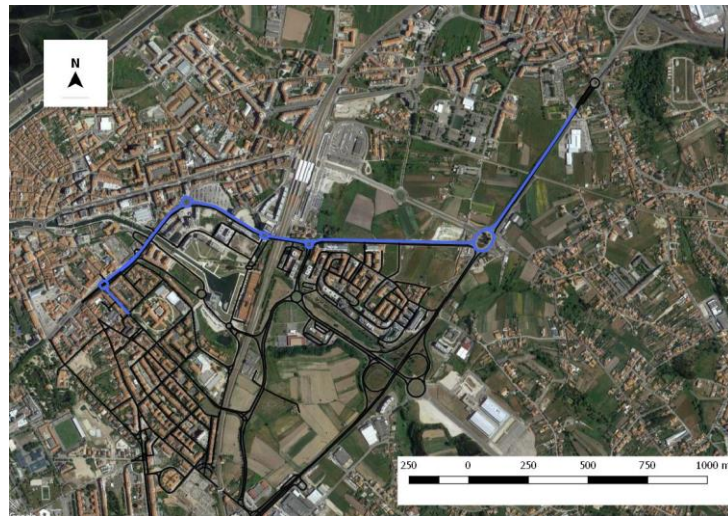
A «Rota 1» tem início na EN 109 seguindo logo na primeira rotunda em direção à Alameda Silva Rocha. Na próxima rotunda ir em direção à Av. Central onde passado pouco tempo será encontrada nova rotunda tendo que se seguir para a Av. Congresso Oposição Democrática. Na rotunda que se segue, ir em direção à Av. 5 de Outubro e finalmente na próxima rotunda ir para a Av. 25 de Abril onde se encontra a Escola Secundária José Estêvão.

A «Rota 2» tem início na EN 109 e na primeira rotunda segue-se para a Alameda Silva Rocha, e de seguida vai-se em direção à Rua Eng. Amaro da Costa, seguindo para a Av. Dr. Sá Carneiro até à intersecção onde se segue para a Av. 25 de Abril até à Escola Secundária José Estêvão.

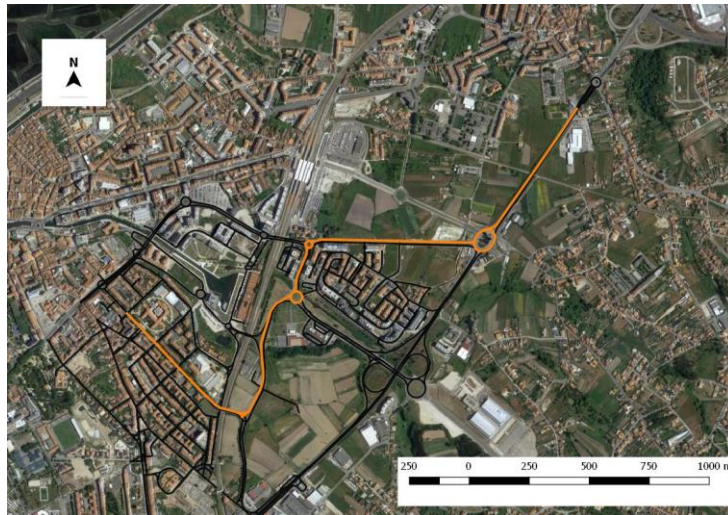
A «Rota 3» inicia-se na EN 109 sendo que na rotunda em vez de se seguir para a Alameda Silva Rocha como as duas rotas anteriormente exemplificadas, continua-se pela EN 109 até à rotunda que dá acesso à R. Borges e por consequente à Av. 25 de Abril e Escola Secundária José Estêvão.

Segue-se a representação das rotas no QGIS na figura 19.

a)



b)



c)

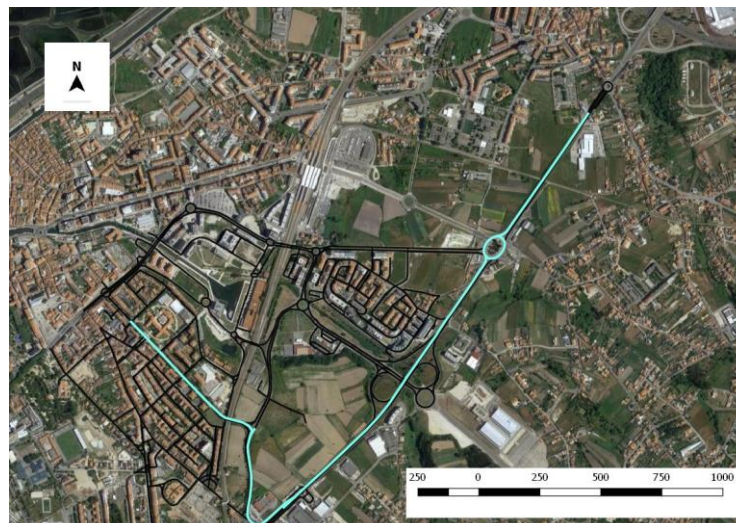


Figura 19 - Representação das 3 rotas em estudo. a) Rota 1; b) Rota 2; c) Rota 3.



Utilizando a base de dados criada no QGIS procede-se para a contabilização no Excel dos custos sociais, emissões, entre outros impactes associados a cada rota. Neste caso de estudo foi incluído um custo associado aos acidentes (0,003€/vkm) seguindo as recomendações de Korzhenevych et al. (2014).

### 3.7.2. Problema de otimização de rota 2

Realizou-se outro problema de otimização de rota de forma a estudar o fenómeno do congestionamento e para atestar a importância de utilizar este fator numa futura plataforma de otimização de tráfego.

Na figura 21 a) encontra-se o trajeto natural para realizar a viagem entre a rotunda anexa à Al. Silva Rocha e a EN 109. No entanto por vezes o segmento de rede correspondente à Al. Silva Rocha (figura 22) encontra-se com elevados níveis de congestionamento, por experiência pessoal, sendo esse fato também refletido no Google Traffic (figura 20). Estudou-se, portanto, quanto tempo de viagem, ou de espera, se tem que ter na Al. Silva Rocha para que compense em termos de custos ambientais (custos associados ao CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e NMVOC) optar pela rota alternativa (figura 21 b)).



Figura 20 - Tráfego típico na Al. Silva Rocha. Segunda-feira 18h20min. Google Traffic (2017).

a)



b)



Figura 21 - Representação das 2 rotas em estudo. a) Rota 1a – trajeto natural; b) Rota 2<sup>a</sup> – rota alternativa.





Figura 22 - Aplicação do fator associado ao congestionamento.

### **3.8. Acidentes entre veículos e utentes vulneráveis**

---

Os dados relativos aos acidentes entre veículos e utentes vulneráveis (peões e ciclistas) são disponibilizados pela ANSR e incluem o espaço temporal entre o ano de 2012 e o ano de 2015.

Alguns sinistros não tinham as coordenadas GPS associadas, tendo sido necessário realizar a georreferenciação dos mesmos, pois só com esta informação é possível importar para a plataforma SIG. O processo é o seguinte:

- Recolha e tratamento dos dados (georreferenciação de sinistros sem coordenadas definidas);
- Importar os dados para a plataforma SIG;
- Catalogação da informação por anos, gravidade do sinistro e número de feridos;

## 4. Resultados e discussão

---

### 4.1. Base de dados

---

A base de dados criada consiste num conjunto de *links* com cada um a ter vários indicadores associados. Podemos ver na tabela 7 a informação que está associada a cada *link* no QGIS.

A plataforma por agora diz respeito a um veículo típico, sendo que futuramente poderá acomodar informação sobre os impactes totais, assim que haja informação sobre volumes de tráfego ou seja será possível estabelecer relações funcionais entre os padrões de dinâmica microscópica e a procura geral na rede.

Tabela 7 - Informação presente em cada *link* associado a um segmento da rede rodoviária.

Informação presente em cada <i>link</i>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Id;</li><li>• Comprimento;</li><li>• g CO<sub>2</sub> (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• g NO<sub>x</sub> (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• g NMVOC (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• g CO<sub>2</sub>/km (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• g NO<sub>x</sub>/km (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• g NMVOC/km (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• Custo CO<sub>2</sub> (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• Custo NO<sub>x</sub> (<i>diesel</i> / gasolina);</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Custo NMVOC (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• Ruído;</li><li>• Custo ruído;</li><li>• Custo total (<i>diesel</i> / gasolina) sem fator de exposição;</li><li>• Velocidade média;</li><li>• Tipologia de via;</li><li>• Fator de exposição;</li><li>• Custo com fator de exposição (<i>diesel</i> / gasolina);</li><li>• Custo/km (<i>diesel</i> / gasolina).</li></ul>

Ao todo a rede rodoviária em estudo é composta por 243 *links*. Através da informação disposta na tabela 7 é possível realizar análise espacial através da catalogação das várias variáveis presentes em cada *link* assim como pode ser utilizada em algoritmos de otimização de rota. Dessa forma foram realizados vários mapas onde alguns indicadores são expostos.

Na figura 23 está representada a velocidade média obtida nos vários troços da rede em estudo.

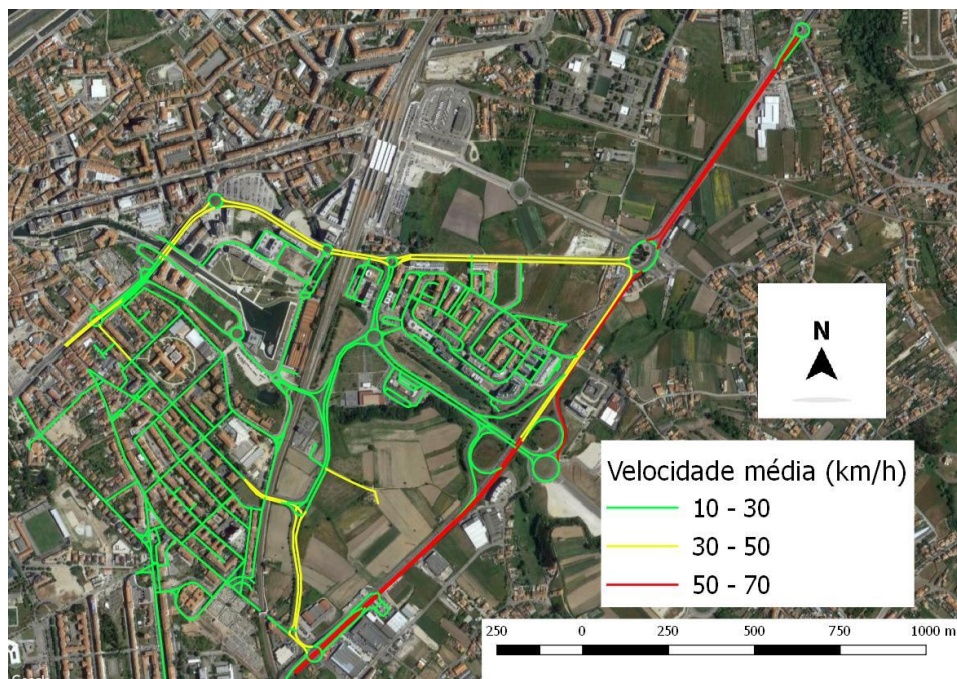


Figura 23 - Representação da velocidade média (km/h) obtida na rede em estudo.

É possível verificar que as zonas onde a velocidade média é mais elevada é em troços de vias fora da área urbana, como a EN 109. Zonas residenciais obtêm uma velocidade média mais baixa.

O ruído produzido por um único veículo a um raio de propagação de 7,5 m encontra-se ilustrado na figura 24.

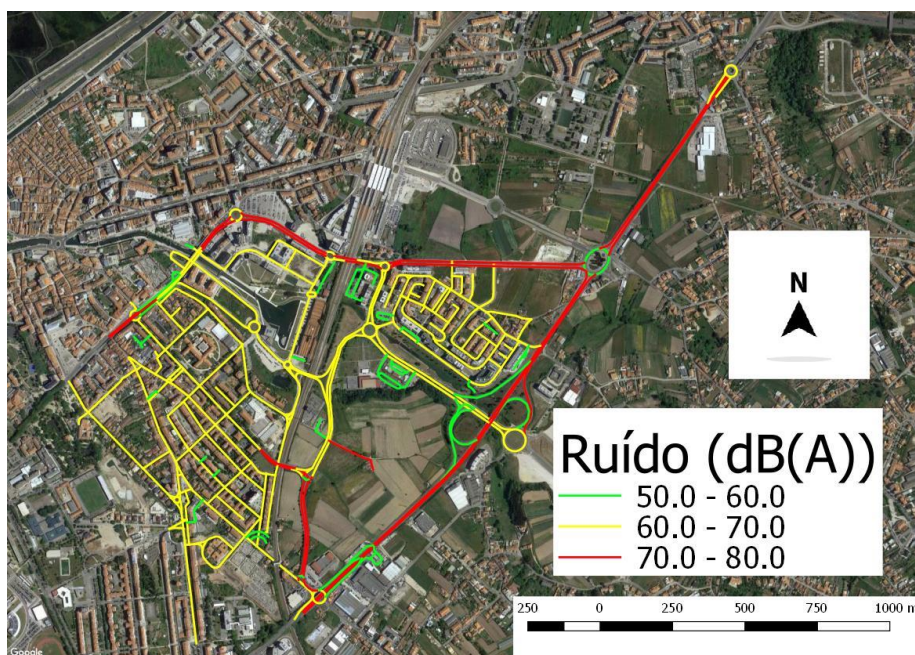


Figura 24 - Ilustração dos níveis de ruído obtidos na rede em estudo.



Sendo a velocidade média a variável utilizada no cálculo do ruído propagado por apenas um veículo, as vias onde se obtém velocidade média mais elevada, são aquelas que também produzem níveis de ruído mais elevados como por exemplo a EN 109 e a Alameda Silva Rocha.

Nas figuras 25 e 26 encontra-se exposto os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> para um veículo a *diesel* e um a gasolina.

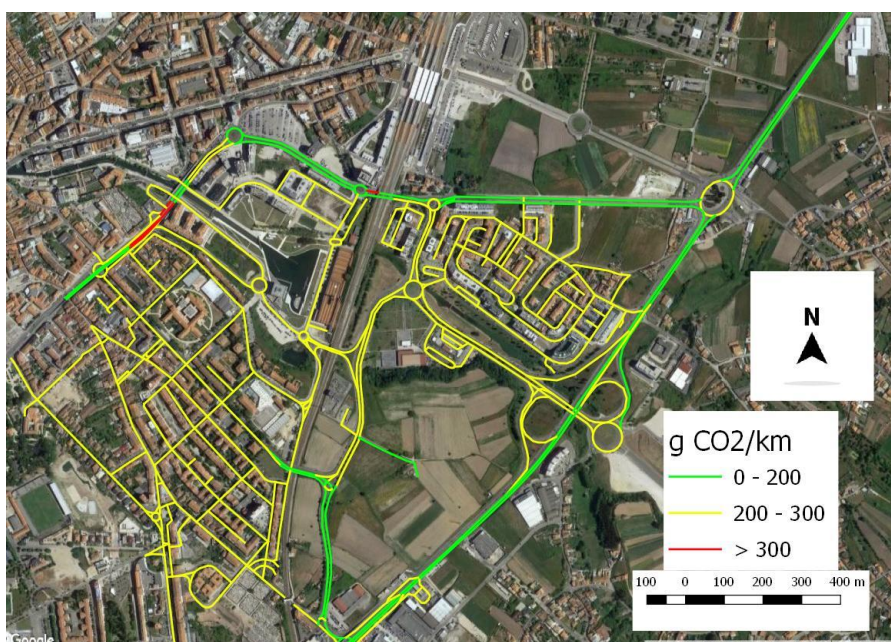


Figura 25 – Fator de emissão de CO<sub>2</sub> em g/km para um veículo a *diesel* na rede em estudo.

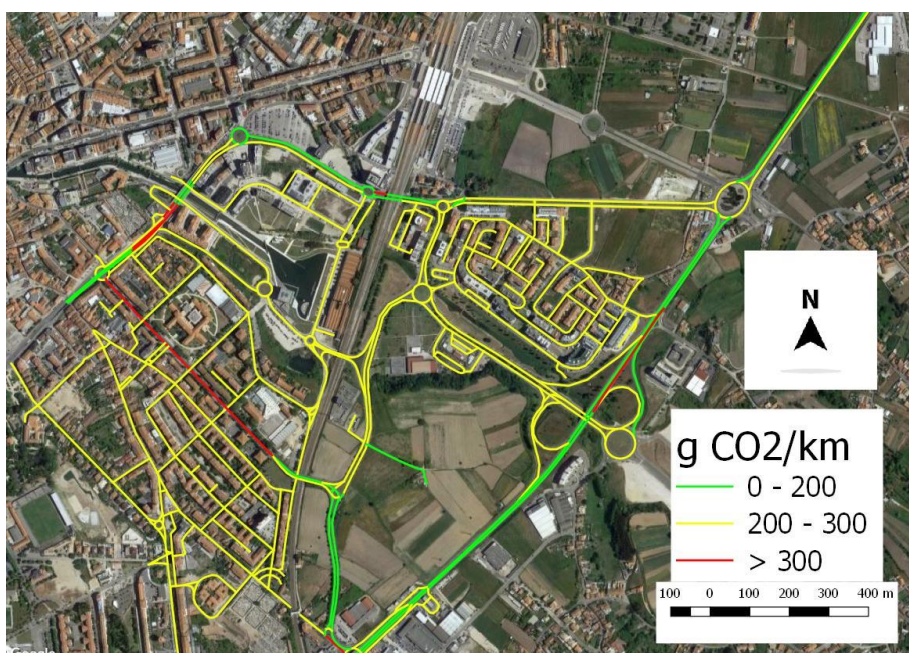


Figura 26 – Fator de emissão de CO<sub>2</sub> em g/km para um veículo a gasolina na rede em estudo.

Zonas onde a velocidade média é mais elevada (por volta dos 50-70 km/h) tendem a ter menores níveis de CO<sub>2</sub>/km. No caso dos veículos a *diesel* apenas uma pequena parte da Av. 5 de Outubro e da Avenida Central apresentam emissões superiores a 300 g CO<sub>2</sub>/km, com grande parte da rede rodoviária mais residencial a situar-se entre os 200 e os 300 g CO<sub>2</sub>/km e as vias em que a dinâmica de veículos pressupõe uma maior velocidade e menos variações dessa mesma velocidade, como a EN 109, a ter um valor abaixo dos 200 g CO<sub>2</sub>/km.

Para veículos a gasolina subsistem mais troços com emissões superiores a 300 g CO<sub>2</sub>/km para além daqueles pequenos *links* na Av. 5 de Outubro e Av. Central, como por exemplo a Av. 25 de Abril. Mais uma vez as zonas mais residenciais a terem um valor de emissões entre os 200 e os 300 g CO<sub>2</sub>/km e as vias suscetíveis à prática de maiores velocidades a obterem um valor menor que 200 g CO<sub>2</sub>/km, apesar de uma pequena parte da EN 109 ter valores superiores a 300 g CO<sub>2</sub>/km.

A média de emissões de CO<sub>2</sub> para um veículo a *diesel* é de 220,08 g CO<sub>2</sub>/km. No segmento de rede correspondente à Avenida Central, e aqueles dois segmentos correspondentes à Av. 5 de Outubro obtiveram-se valores de 359,3 g CO<sub>2</sub>/km (63% acima do valor médio), 432,6 g CO<sub>2</sub>/km (97% acima do valor médio) e 427,2 g CO<sub>2</sub>/km (94% acima do valor médio), respetivamente.

Para um veículo a gasolina o nível médio de emissões de CO<sub>2</sub> é de 229,74 g CO<sub>2</sub>/km. No segmento de rede correspondente à Avenida Central, aqueles dois segmentos da Av. 5 de Outubro e o segmento de rede corresponde à Av. 25 de Abril obtiveram-se valores de 383,1 g CO<sub>2</sub>/km (67% acima do valor médio), 428,7 g CO<sub>2</sub>/km (87% acima do valor médio), 423,3 g CO<sub>2</sub>/km (84% acima do valor médio) e 336,7 g CO<sub>2</sub>/km (47% acima do valor médio), respetivamente.

Nas próximas figuras 27 e 28 encontram-se os fatores de emissão de NO<sub>x</sub> (em g/km).



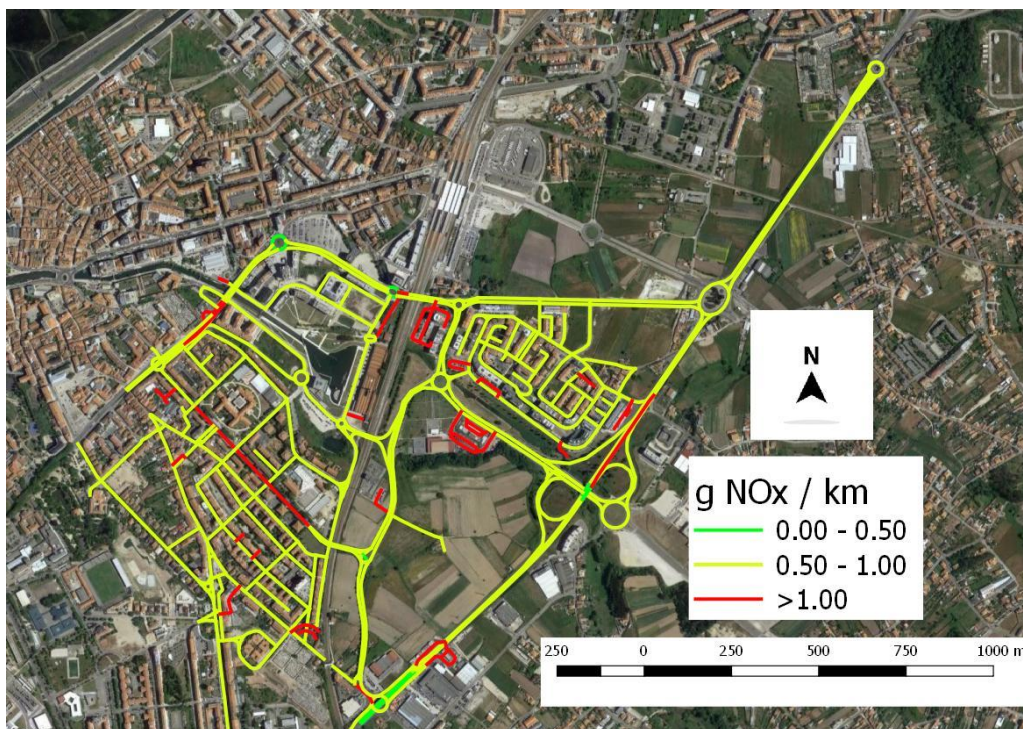


Figura 27 – Fator de emissão de NO<sub>x</sub> em g/km para um veículo a *diesel* na rede em estudo.

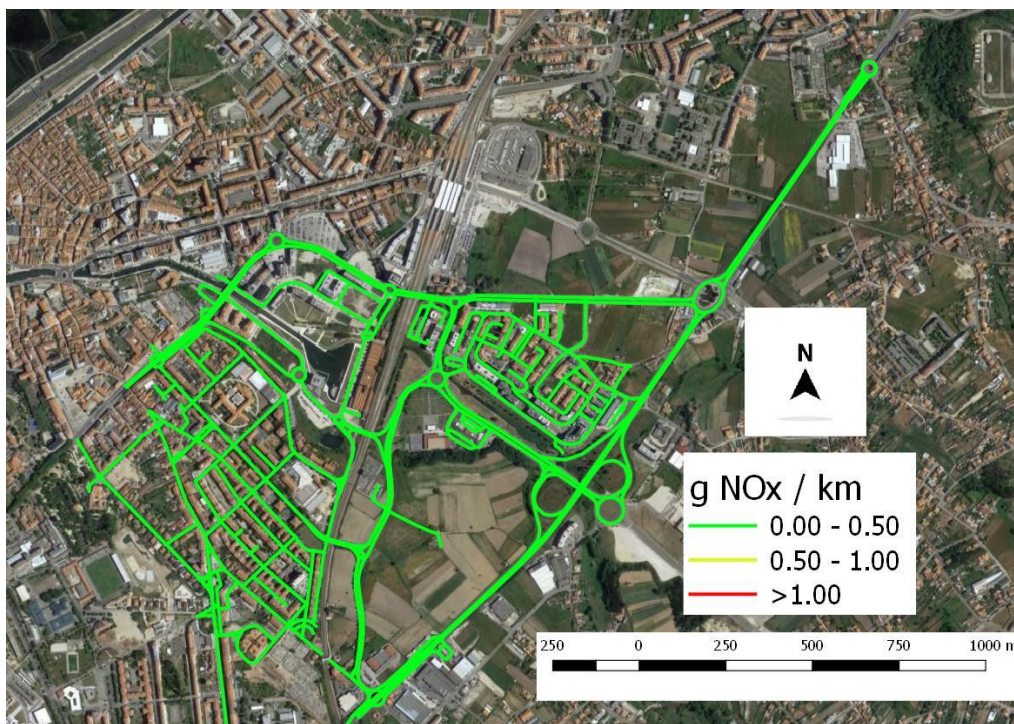


Figura 28 – Fator de emissão de NO<sub>x</sub> em g/km para um veículo a gasolina na rede em estudo.

Tal como expectável, os valores de g NO<sub>x</sub>/km são mais significativos em veículos a *diesel* do que em veículos a gasolina. As emissões de NO<sub>x</sub> estão mais associadas a veículos *diesel* pois a combustão nos veículos de tecnologia *diesel* dá-se a temperaturas mais altas



do que em veículos a gasolina, o que favorece a produção de  $\text{NO}_x$  (Omnagen., 2017), com a base de dados a refletir esse mesmo princípio.

O valor médio obtido para emissões de  $\text{NO}_x$  em veículos a *diesel* é de 0,84 g  $\text{NO}_x$ /km, o segmento de rede onde se verificaram mais emissões de  $\text{NO}_x$  foi na Av. 5 de Outubro, com valores de 1,81 g  $\text{NO}_x$ /km, valor superior 114% ao valor médio obtido.

O valor médio para veículos a gasolina é de 0,23 g  $\text{NO}_x$ /km, com toda a rede rodoviária em estudo a ter um bom desempenho quanto a este indicador.

As figuras 29 e 30 representam os fatores de emissão do NMVOC (em g/km) para veículos a *diesel* e a gasolina.

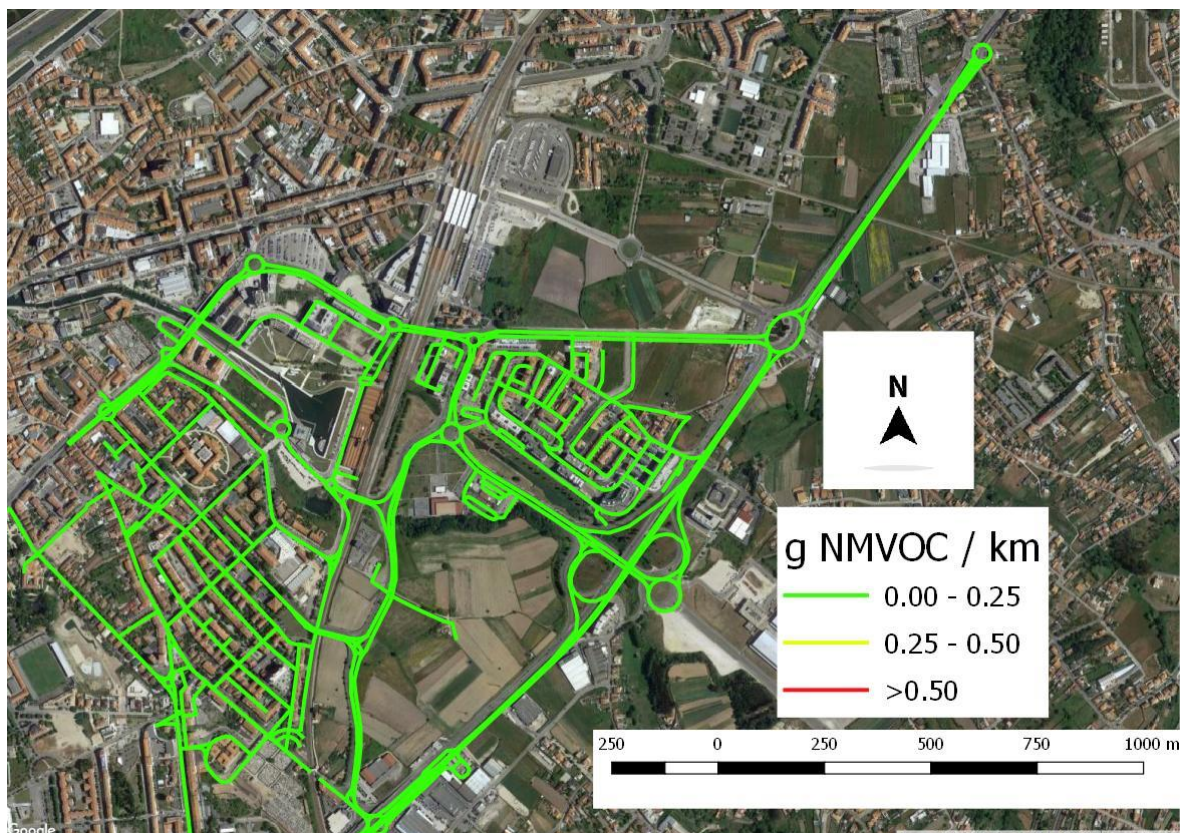


Figura 29 – Fator de emissão de NMVOC em g/km para um veículo a *diesel* na rede em estudo.

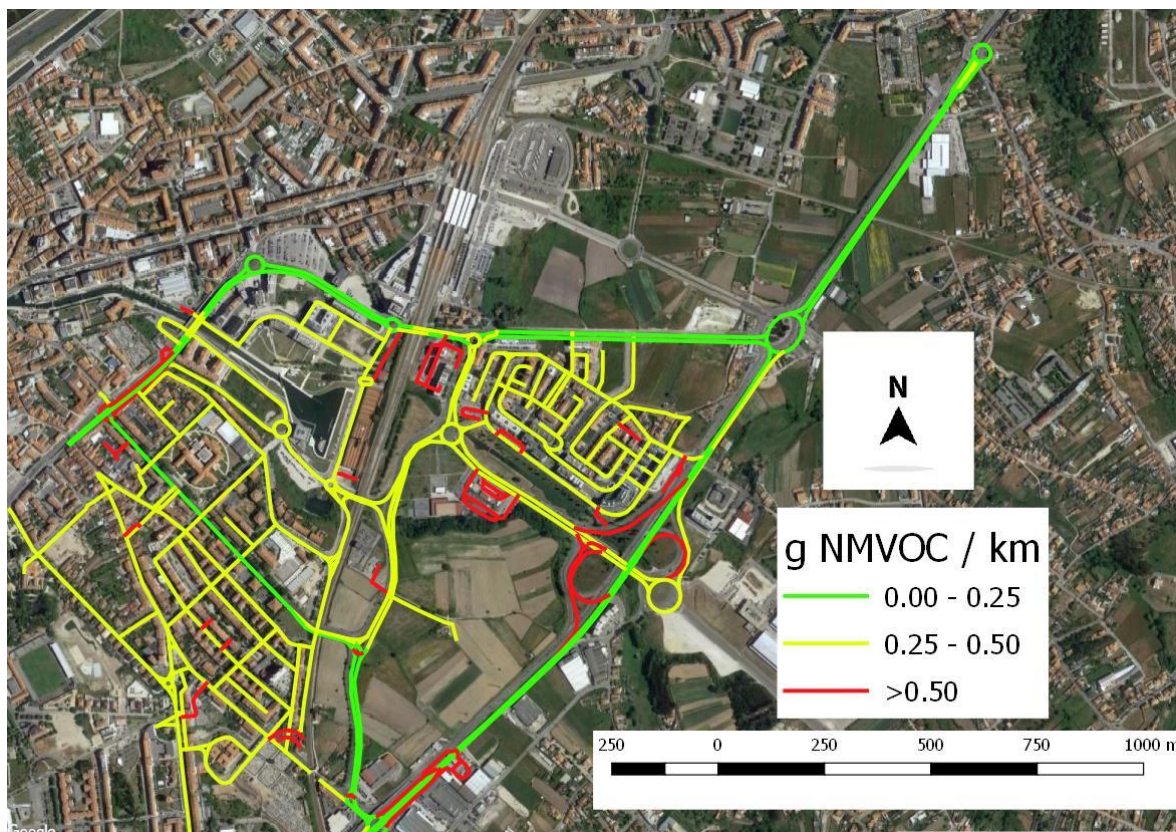


Figura 30 – Fator de emissão de NMVOC em g/km para um veículo a gasolina na rede em estudo.

Contrariamente ao que acontece no  $\text{NO}_x$ , as emissões de NMVOC são mais significativas em veículos a gasolina do que em veículos a *diesel*, com estas por norma a representarem cerca de 1 a 2 % das emissões totais de poluentes para veículos a gasolina, e cerca de 0,3% para veículos a *diesel* (WinACC., 2015), estando este facto representado no inventário de emissões realizado.

A média obtida para veículos a *diesel* é de 0,05 g NMVOC/km, com todos os segmentos de rede a terem um bom desempenho.

No caso de veículos a gasolina o valor médio é de 0,44 g NMVOC/km, sendo as vias mais problemáticas aquelas onde a velocidade média é mais baixa, como por exemplo vias do tipo *service* (por exemplo em parques de estacionamento, com valores 52% superiores em relação ao valor médio verificado).

Nas figuras 31 e 32 serão apresentados os custos sociais associados a um veículo *diesel* e gasolina em €/km.



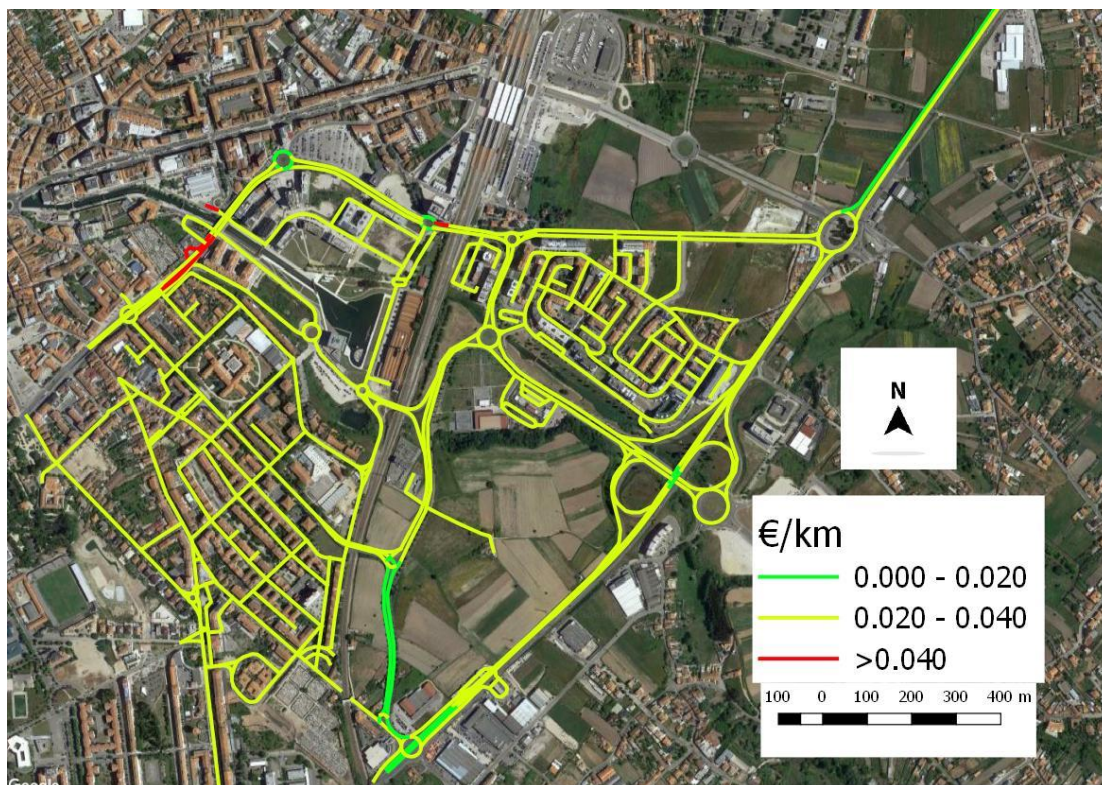


Figura 31 - Custos sociais associados em €/km para um veículo *diesel*.

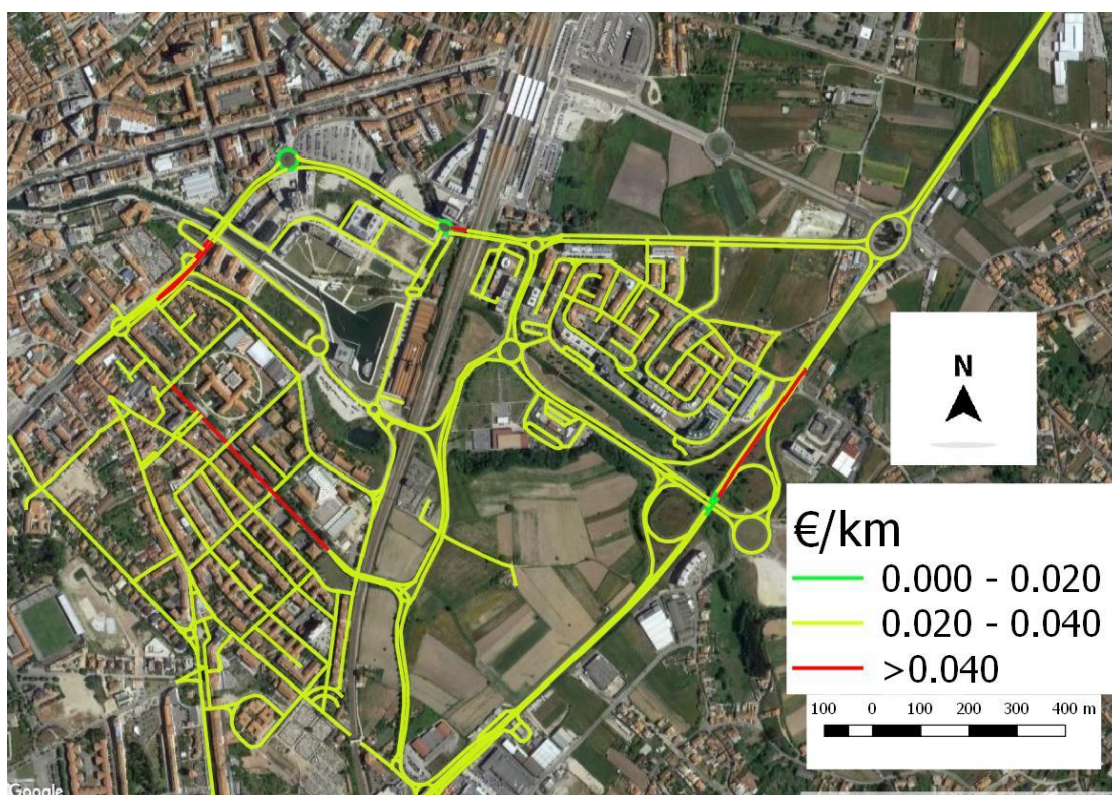


Figura 32 - Custos sociais associados em €/km para um veículo a gasolina.



Os custos sociais/ambientais, em termos espaciais não variam muito entre um veículo a *diesel* e um a gasolina, em ambos os casos temos maiores custos na zona da Av. 5 de Outubro e na Av. 25 de Abril.

O valor médio verificado para veículos *diesel* é de 0,0306 €/km, com a zona da Av. 5 de Outubro a obter valores de 0,0562 €/km (valor 83% superior à média) e na Av. Central, onde se obtiveram valores de 0,0430 €/km (valor 40% superior ao valor médio verificado).

Em veículos a gasolina, o valor médio verificado é de 0,0305 €/km, sendo os segmentos de rede mais problemáticos aqueles correspondentes à Av. 5 de Outubro (0,0514 €/km, 68% superior à média), à Av. 25 de Abril (0,0425 €/km, 39% superior à média) e à Av. Central (0,0424 €/km, 39% superior à média).

## 4.2. Acidentes entre veículos e utentes vulneráveis

Em relação aos acidentes entre veículos e utentes vulneráveis, entre o ano de 2012 e 2015 temos a seguinte dispersão (figura 33). Neste caso, a área em estudo é toda a rede rodoviária urbana de Aveiro.

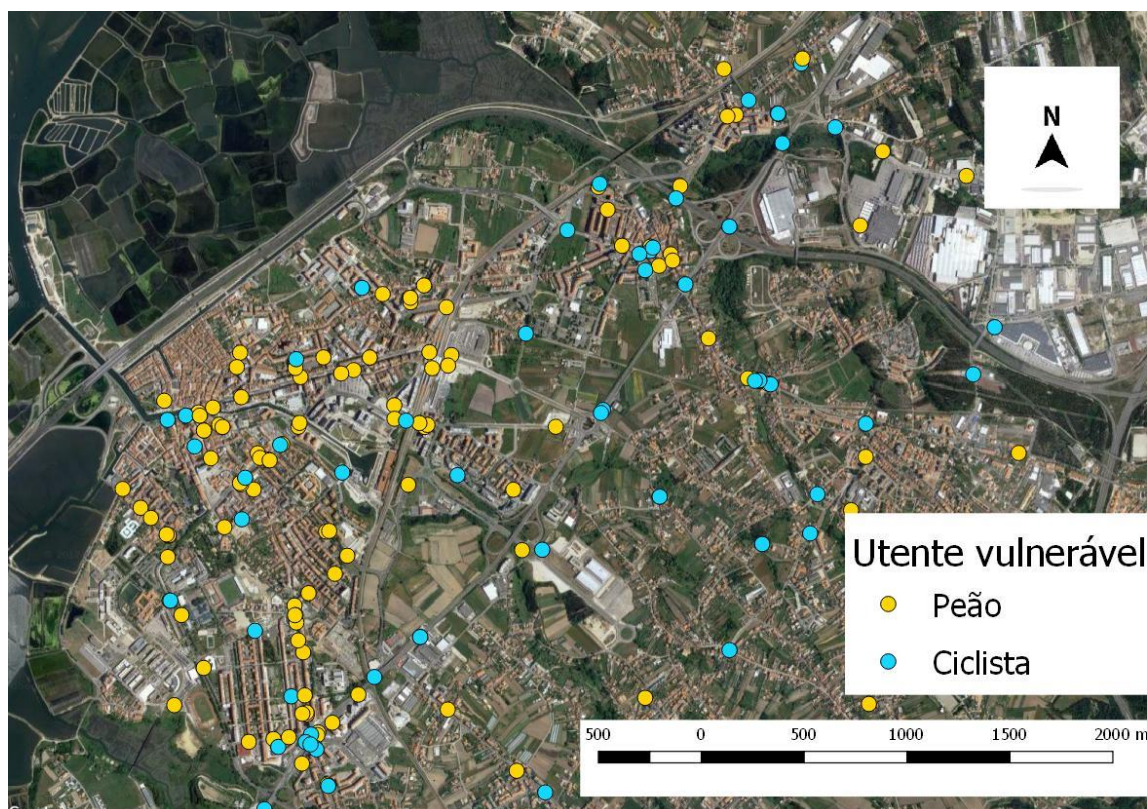


Figura 33 – Dispersão dos acidentes rodoviários e respetiva catalogação por utente vulnerável.

Analisando a figura é possível verificar que o utente vulnerável mais afetado é o peão, com um foco maior de acidentes na Rua Mário Sacramento, na Rua de Calouste Gulbenkian, na Av. Dr. Lourenço Peixinho e na Rua Dom Sancho I (na figura 34 encontram-se as vias onde ocorreram mais de 3 acidentes).

Quanto aos ciclistas nota-se uma grande concentração de acidentes na rotunda junto à gasolinheira do Jumbo perto do Glicínias, junto à Igreja Batista de Esgueira na rua Bento Moura e na rua Dom Sancho I junto à farmácia Capão Filipe (na figura 35 encontram-se as vias onde ocorreram mais de 3 acidentes).

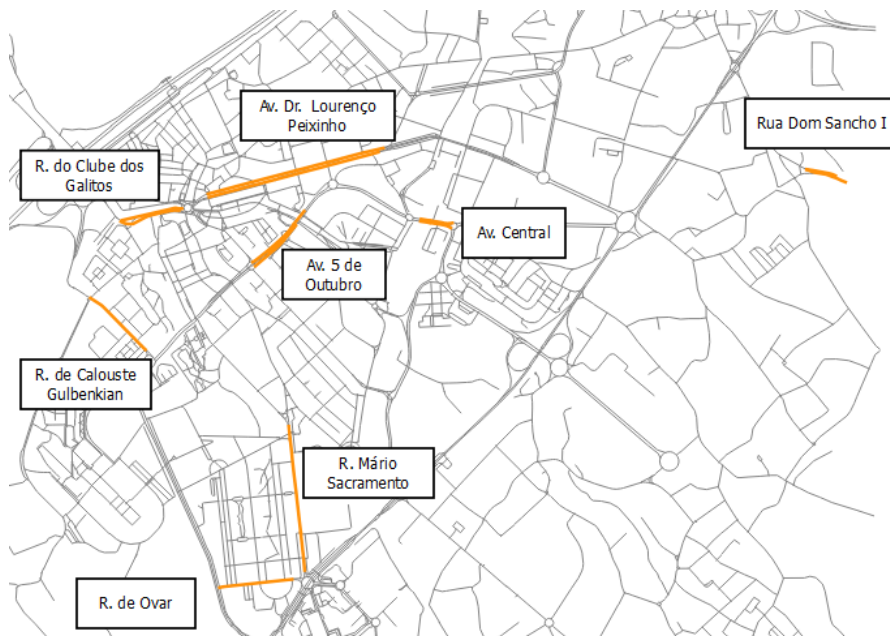


Figura 34 - Vias onde ocorreram mais de 3 acidentes entre veículos e peões para o período entre 2012 e 2015.

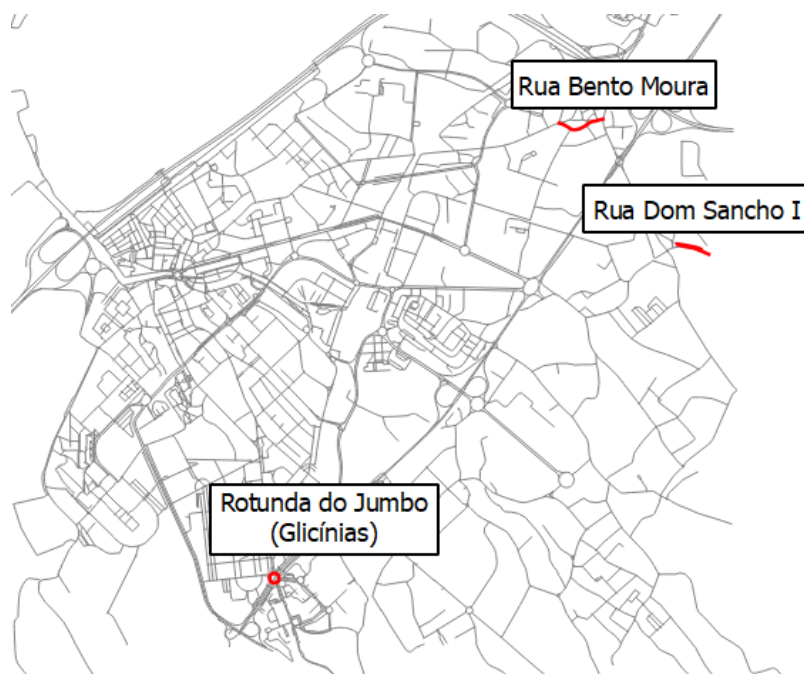


Figura 35 - Vias onde ocorreram mais de 3 acidentes entre veículos e ciclistas para o período entre 2012 e 2015.



Salienta-se a Rua Dom Sancho I como uma rua especialmente vulnerável, apesar da sua pequena extensão é a única via onde simultaneamente ocorreram mais de 3 acidentes para ambos os utentes vulneráveis, 3 entre veículos e peões e 3 entre veículos e ciclistas. Esta rua corresponde a um troço da EN 230 onde numa extensão de apenas 200m existem quatro intersecções.

Com base na análise espacial realizada por Vilaça et al., (2017) realizou-se com os dados recolhidos a mesma análise assente no *Kernel Density Estimation* (KDE), que é utilizado para obter padrões das várias variáveis presentes na base de dados. A função utilizada pode ser definida no QGIS, para esta análise usou-se uma função quadrática *kernel*:

- $f(x,y) = \frac{1}{mr^2} \sum_{i=1}^m K\left(\frac{d_i}{r}\right)$ ,

onde  $f(x,y)$  é a densidade estimada para a localização  $(x,y)$ ,  $m$  é o número de observações e  $K$  é a função *kernel*:

- $K\left(\frac{d_i}{r}\right) = \begin{cases} K \left(1 - \frac{d_i^2}{r^2}\right), & 0 < d_i \leq r \\ 0, & d_i > r \end{cases}$ ,

onde  $d_i$  é a localização observada.

Foi realizado um mapa de calor com base neste princípio onde também é possível verificar a localização dos acidentes por gravidade (figura 36). Analisando a figura 36 é possível verificar que a zona do centro de Aveiro e a zona junto ao Glicínias são os locais onde se registam mais ocorrências apesar de grande parte serem feridos ligeiros.

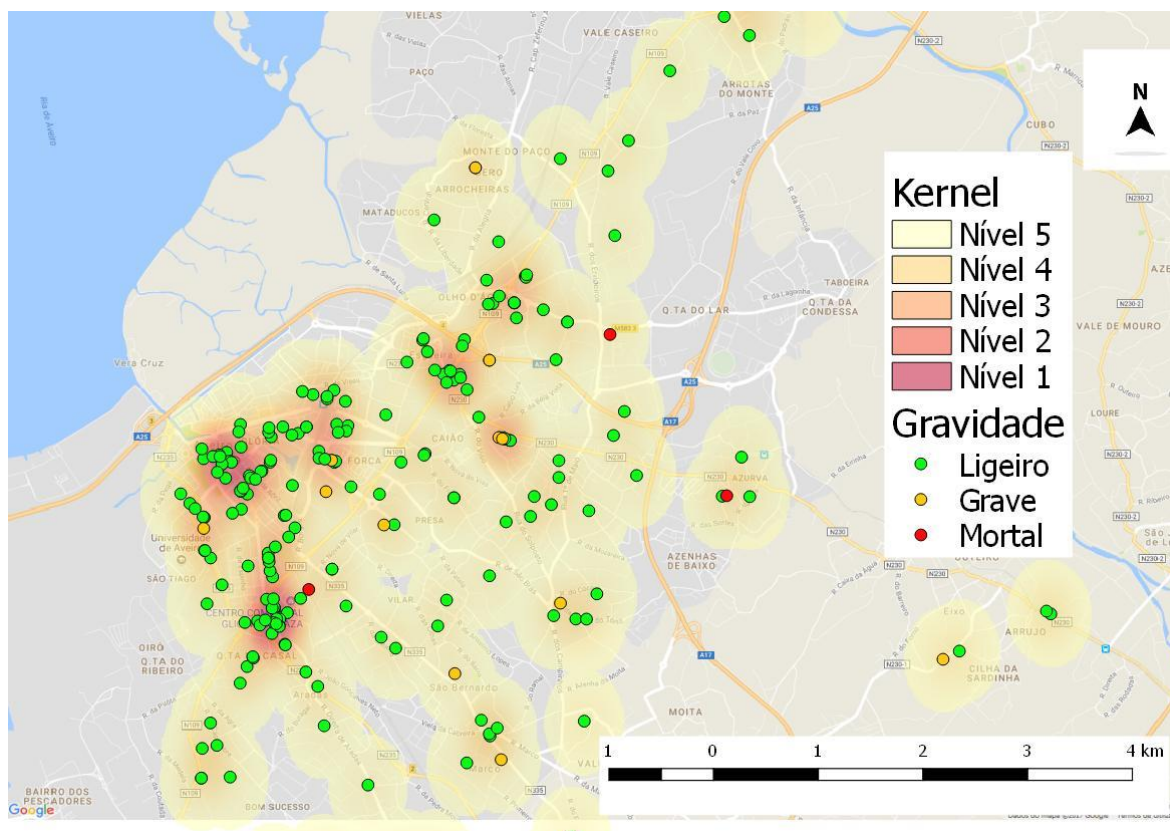


Figura 36 - Mapa de calor dos vários acidentes que ocorreram assim como a localização dos mesmos por gravidade.

### 4.3. Resultados e discussão dos problemas de otimização considerados

Nos próximos subcapítulos encontram-se os resultados obtidos nos problemas de otimização considerados de forma a testar base de dados.

#### 4.3.1. Problema de otimização de rota 1

Tal como descrito na secção 3.7.1 – Problema de otimização de rota 1, o problema de otimização considera 3 rotas para uma viagem a iniciar na EN 109 e a terminar na Escola Secundária José Estêvão.

De forma a otimizar a rota foram tidos em conta vários parâmetros como a distância, o tempo de viagem, o ruído médio, as emissões de CO<sub>2</sub>, as emissões de NO<sub>x</sub>, as emissões de NMVOC e finalmente os custos associados, tanto para veículos *diesel* como a gasolina.

Os resultados obtidos para um veículo *diesel* encontram-se expostos na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados obtidos no problema de otimização de rota 1 para um veículo *diesel*.

Parâmetro	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Unidades
Tempo de viagem	5	4	5	Min.
Distância	2,7	2,8	3,2	km
CO <sub>2</sub>	604,47	625,63	605,63	g CO <sub>2</sub>
NO <sub>x</sub>	2,56	2,59	2,52	g NO <sub>x</sub>
NM VOC	0,071	0,091	0,068	g NM VOC
Ruído	68,03	68,70	69,96	dB(A)
Velocidade média	32,99	34,88	40,15	km/h
Custo ruído	0,0267	0,0266	0,0287	€
Custo acidentes	0,0111	0,0111	0,0120	€
Custo ambiental	0,0605	0,0622	0,0601	€
Custo total	0,0983	0,0999	0,1008	€
CO <sub>2</sub> /km	223,88	223,44	189,26	g CO <sub>2</sub> /km
NO <sub>x</sub> /km	0,949	0,926	0,787	g NO <sub>x</sub> /km
NM VOC/km	0,026	0,032	0,021	g NM VOC/km
Legenda	Melhor resultado	2º melhor resultado	Pior resultado	

Analisando a tabela 8 é possível verificar que as 3 rotas têm parâmetros em que são melhores.

Em termos de CO<sub>2</sub>, a rota 1 é a que obtém melhor desempenho, com emissões de CO<sub>2</sub> 3,4% mais baixas que a rota mais rápida. Em emissões de NO<sub>x</sub> e de NM VOC a rota com melhor desempenho é a rota 3, que obtém emissões 2,8% mais baixas de NO<sub>x</sub> e 25,5% mais baixas de NM VOC em relação à rota mais rápida. Em termos de valores absolutos do

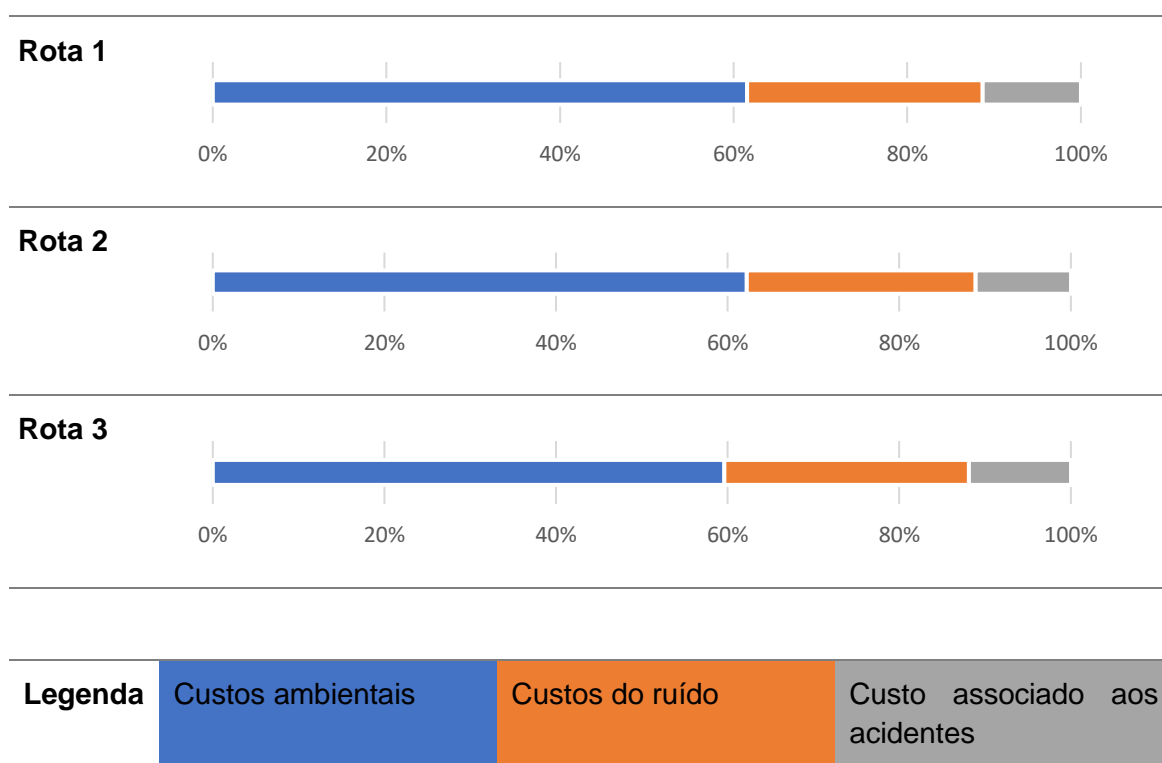
nível de propagação sonora, a rota com melhor desempenho é a rota 1 e a que tem pior desempenho é a rota 3, estando este facto, provavelmente, ligado com a velocidade média ser também inferior na rota 1 e superior nas outras duas rotas. No entanto quando se calculam os custos, a rota com um custo associado ao ruído inferior é a rota 2, provavelmente devido a esta coincidir com menos troços classificados como sensíveis.

Em termos de custos associados a rota que implica menores custos sociais/ambientais é a rota 1, seguida da rota 2 e por último a rota 3. A rota 1 implica um custo 2,52% inferior em relação à rota mais dispendiosa (rota 3) e um custo 1,64% inferior em relação à rota mais rápida (rota 2).

Analisando os resultados é possível verificar que o desempenho das rotas para um veículo *diesel* depende de cada um dos parâmetros, não existindo uma “rota ideal”. A escolha da melhor rota dependerá da valorização que o utilizador dará a cada um dos parâmetros.

Foi também realizado o deslastre do custo social por custo associado ao ambiente (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e NMVOC), ruído e acidentes rodoviários.

Tabela 9 - Deslastre do custo total por custo associado ao CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC e ruído para um veículo a *diesel*.



O comportamento das 3 rotas em termos de emissões específicas dos impactes considerados é similar. Os custos associados às emissões (onde se engloba CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e NMVOC) contam cerca de 61% do custo total, enquanto que o custo associado ao ruído é

de cerca de 27% do custo total, ficando o custo associado aos acidentes rodoviários com uma quota de 12% em relação ao custo total.

A otimização de rota também se desenvolveu para veículos a gasolina, com os seguintes resultados expostos na tabela 10.

Tabela 10 - Resultados obtidos no problema de otimização de rota 1 para um veículo a gasolina.

Parâmetro	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Unidades
<b>Tempo de viagem</b>	5	4	5	Min.
<b>Distância</b>	2,7	2,8	3,2	km
<b>CO<sub>2</sub></b>	721,04	747,16	776,15	g CO <sub>2</sub>
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,55	0,62	0,51	g NO <sub>x</sub>
<b>NMVOC</b>	0,43	0,65	0,32	g NMVOC
<b>Ruído</b>	68,03	68,70	69,96	dB(A)
<b>Velocidade média</b>	32,99	34,88	40,15	km/h
<b>Custo ruído</b>	0,0267	0,0266	0,0287	€
<b>Custo acidentes</b>	0,0111	0,0111	0,0120	€
<b>Custo ambiental</b>	0,0668	0,0693	0,0713	€
<b>Custo</b>	0,1046	0,1071	0,1121	€
<b>CO<sub>2</sub>/km</b>	267,05	266,84	242,55	g CO <sub>2</sub> /km
<b>NO<sub>x</sub>/km</b>	0,204	0,220	0,159	g NO <sub>x</sub> /km
<b>NMVOC/km</b>	0,159	0,233	0,100	g NMVOC/km
<b>Legenda</b>	Melhor resultado	2º melhor resultado	Pior resultado	

Tal como acontece na situação do veículo a *diesel*, cada uma das rotas tem parâmetros onde obtém melhor desempenho.

Em termos de tempo de viagem, custo associado ao ruído e acidentes, continua a ser a rota 2 com os melhores resultados.

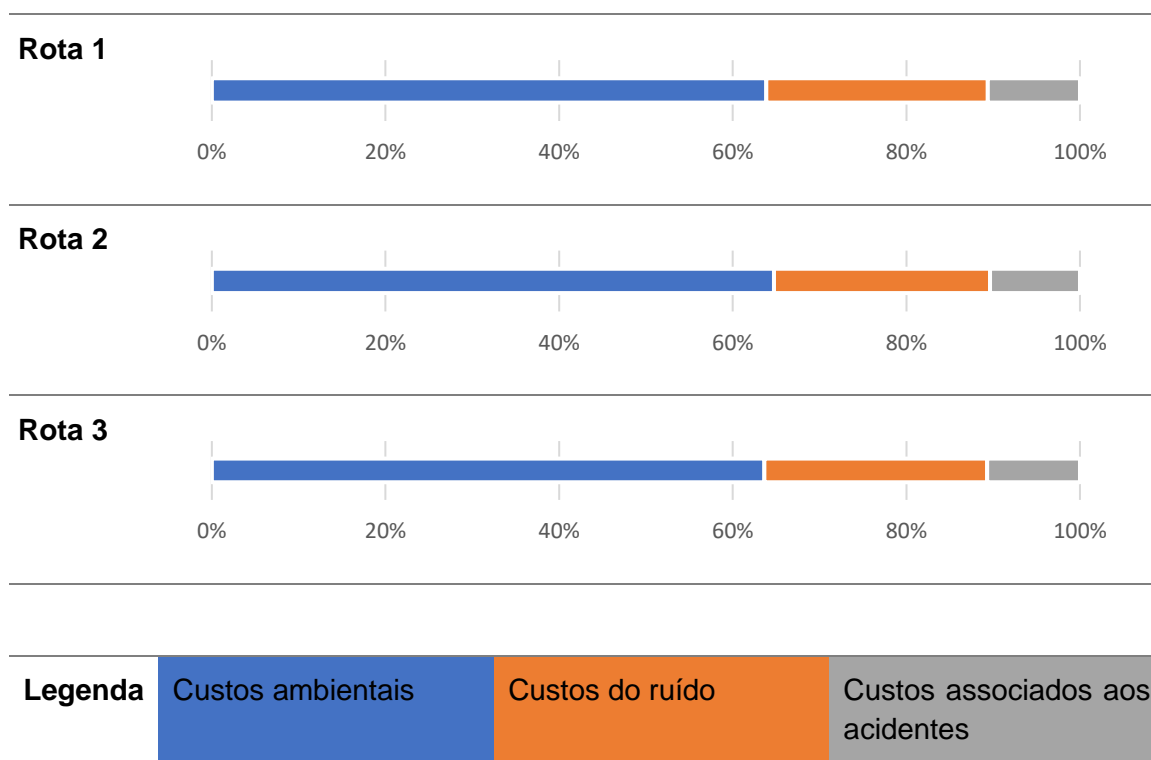
Em emissões de CO<sub>2</sub>, a rota com melhor desempenho é a rota 1, com emissões 3,5% inferiores em relação à rota mais rápida, e 7,1% inferiores em relação à rota 3. Em termos de NO<sub>x</sub> e NMVOC a rota com melhor performance é a rota 3, que obtém valores 17,5% e 50,5% respetivamente, inferiores à rota mais rápida.

Analisando os custos sociais/ambientais, a rota que implica menos custos é a rota 1, com um custo inferior 6,66% inferiores em relação à rota mais dispendiosa (rota 3), e 2,34% inferiores à rota mais rápida (rota 2).

Tal como nos veículos a *diesel*, nos veículos a gasolina cada rota tem melhor performance em certos parâmetros, não existindo a rota “ideal”. A tomada de decisão do utilizador dependerá sempre daquilo que este mais valoriza.

Foi também, como para o veículo a *diesel*, realizado o deslastre do custo total em termos de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MNVOC e ruído, cujo resultado está exposto na tabela 11.

Tabela 11 - Deslastre do custo total por custo associado ao CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC e ruído, para um veículo a gasolina.

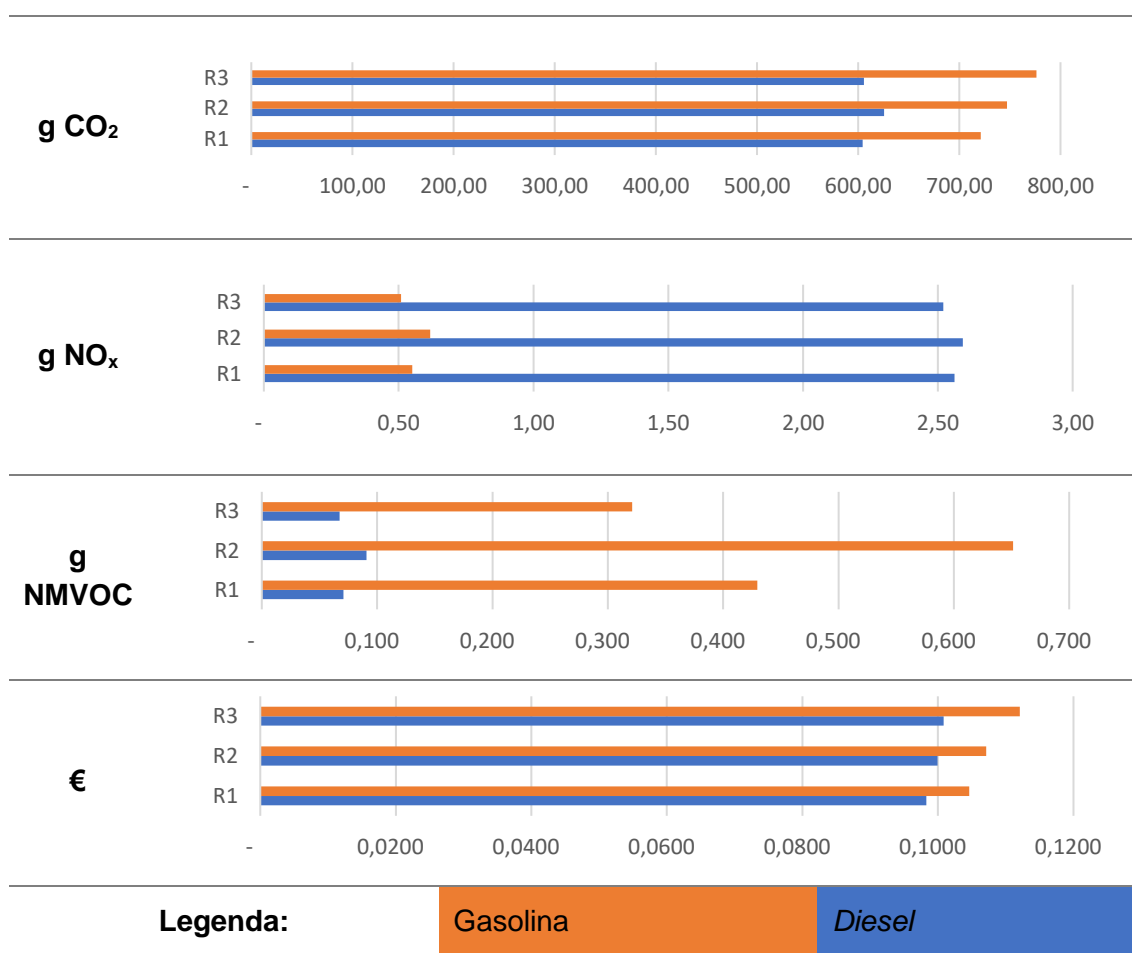


Analisando a tabela 11, é possível verificar que os resultados não diferem muito dos obtidos para o veículo a *diesel*. Os custos ambientais continuam a ter a maior quota (cerca de 64%), com os custos associados ao ruído e aos acidentes a ocuparem uma quota de 25% e 11% respetivamente.

Foram analisadas as diferenças entre a utilização de um veículo a *diesel* ou a gasolina, com a rota 1 a ser a mais económica para um veículo a *diesel* e também para um veículo a gasolina. Irá também analisar-se a diferença de emissões e de custos entre veículos a *diesel* e gasolina (tabela 12) e a influência que a incorporação do fator de exposição tem no resultado final (tabela 13).

Na tabela 12 encontra-se a comparação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC e custos associados para veículos *diesel* e gasolina. Analisando as diferenças entre as duas tecnologias, é possível verificar que em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, NMVOC e custos associados, o veículo *diesel* obtém melhores resultados, tal resultado entra em conformidade com a análise aos resultados da base de dados. Apenas o NO<sub>x</sub> é mais significativo nos carros a *diesel* que nos carros a gasolina, tal também já seria expectável visto esse fenómeno ter-se também manifestado na análise à base de dados.

Tabela 12 - Comparação de alguns parâmetros entre veículos a gasolina e a *diesel*.



Foi também analisada o aumento percentual que o custo final sofreu com a incorporação do fator associado à exposição das populações, estando os resultados expostos na tabela 13. O custo aumentou ligeiramente, tendo mais influência nos veículos a *diesel*,

provavelmente devido ao custo específico do NO<sub>x</sub> ser superior ao do NMVOC e este ser mais prevalente em veículos a *diesel*.

Tabela 13 - Aumento percentual do custo final com a incorporação do fator de exposição às populações.

	<i>Diesel</i>	Gasolina
<b>R1</b>	6,5%	5,4%
<b>R2</b>	4,8%	4,0%
<b>R3</b>	4,0%	3,2%

#### 4.3.2. Problema de otimização de rota 2

Este problema de otimização insere um elemento novo como forma de teste, o congestionamento. A viagem tem início na rotunda junto à Alameda Silva Rocha e fim na EN 109 e são consideradas 2 rotas, uma onde se verifica o fenómeno recorrente de congestionamentos e outra rota alternativa, mas bem mais longa (cerca de 700 m).

No caso de veículos a *diesel*, seja qual for o tempo de viagem na Al. Silva Rocha, em termos de custos ambientais não compensa optar pela rota alternativa para os tempos de viagem testados (figura 37). O custo ambiental associado à rota alternativa (rota 2a) é de 0,044€, o custo máximo verificado na rota 1a (rota natural para efetuar o trajeto) é de 0,041€. De notar que o tempo de espera/viagem apenas se verifica no segmento de rede associado à Al. Silva Rocha, segmento pertencente à rota1a, permanecendo o custo da rota 2a inalterado.

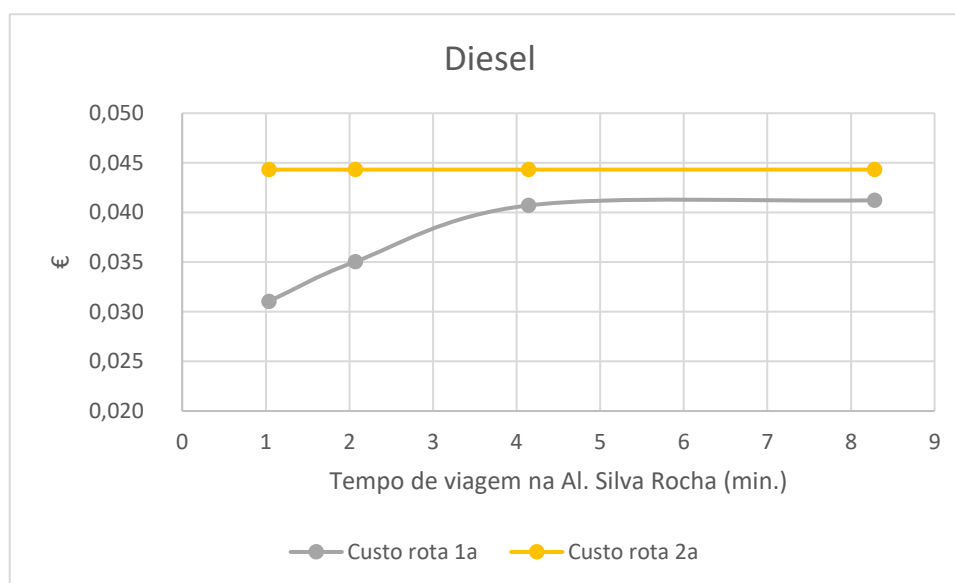


Figura 37 - Custos ambientais associados a ambas as rotas para um veículo a *diesel*.



Para veículos a gasolina, os resultados demonstram que a partir de um certo tempo de viagem/espera na rota 1a começa a compensar efetuar a viagem pela rota 2a como demonstra a figura 38. A partir de um tempo de viagem de 4 minutos e 30 segundos é mais favorável seguir pela rota 2a. O custo associado à rota 2a é de 0,046€, sendo que o custo ambiental associado à rota 1a poderá atingir valores de 0,052€.

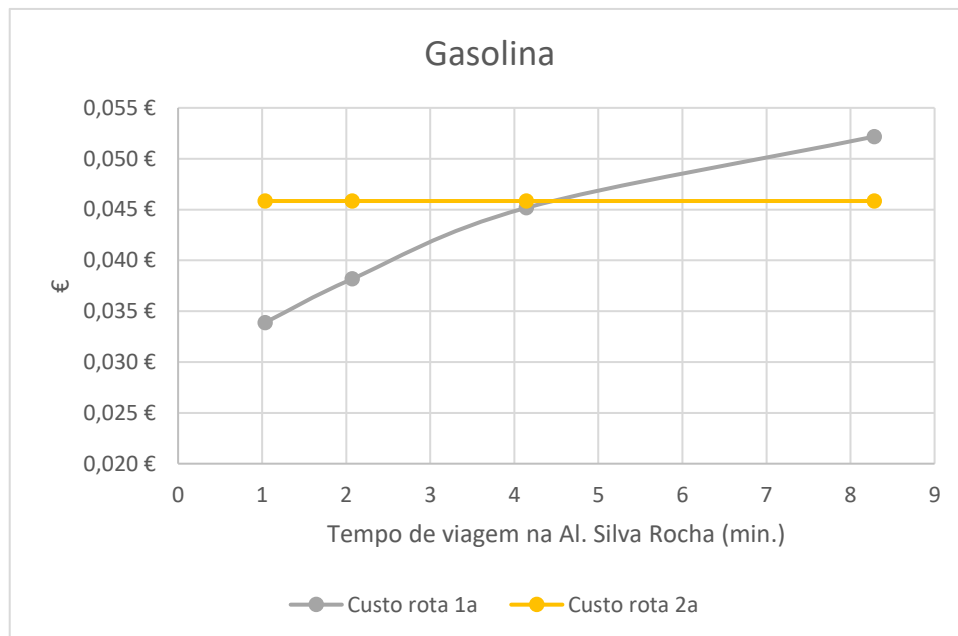


Figura 38 - Custos ambientais associados a ambas as rotas para um veículo a gasolina.

Com este caso de estudo foi possível verificar que as condições do tráfego automóvel podem alterar os resultados. Verificando-se que no caso de veículos a gasolina, começa a compensar seguir por uma rota alternativa (mas bem mais longa) a partir de um certo tempo de espera.



## 5. Conclusões e trabalhos futuros

---

O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de uma base de dados de vulnerabilidades decorrentes do sistema de transportes rodoviário, associando indicadores de desempenho aos vários segmentos de uma parte da rede urbana rodoviária de Aveiro, para identificação de *hotspots* e posterior incorporação em algoritmos de otimização de rota. Indicadores como as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC e o nível de propagação sonoro provenientes de apenas um veículo foram tidas em conta. Testou-se também uma metodologia de forma a custear cada segmento de rede tendo em conta os impactes considerados.

Através da base de dados criada foi possível verificar quais os segmentos de rede que obtêm pior desempenho nos vários indicadores considerados. A base de dados também servirá para ser incorporada numa plataforma de algoritmos de otimização de rota.

Foram identificados alguns *hotspots* de emissões, como a Avenida 5 de Outubro, Avenida Central e Avenida 25 Abril a obterem os piores resultados.

Na Avenida 5 de Outubro, os valores de CO<sub>2</sub> em cada um dos sentidos é 97% e 94% acima do valor médio verificado, para um veículo a *diesel*. Num carro a gasolina os valores são 87% e 84% superiores ao valor médio obtido. No caso do NO<sub>x</sub>, para veículos a gasolina este poluente é pouco significativo, mas no veículo a *diesel* observaram-se valores 114% acima do valor médio. Quando se entra com os custos sociais associados aos impactes considerados, na Av. 5 de Outubro obteve-se valores 83% superiores ao valor médio para veículos a *diesel* e 68% superiores para veículos a gasolina.

Na Av. Central observaram valores altos de CO<sub>2</sub>, para veículos a *diesel* o valor nesta via foi 63% superiores ao valor médio verificado e para veículos a gasolina observaram-se valores 67% superiores à média obtida.

No caso da Av. 25 de Abril verificaram-se valores altos para o CO<sub>2</sub> para veículos a gasolina, com os valores 47% superiores ao valor médio. O custo associado a este segmento de rede também é superior ao valor médio, cerca de 40% superior para veículos a *diesel* e 39% superior para veículos a gasolina.

Foi possível verificar também que vias onde a velocidade praticada é mais baixa existe um *hotspot* de emissões de NO<sub>x</sub> (significativas em veículos a *diesel*) e de NMVOC (significativas em veículos a gasolina), e que vias onde se verificam velocidades mais altas, ocorrem menores emissões de CO<sub>2</sub>, sugerindo-se, portanto, que futuramente se equacione um fator relacionado com o congestionamento, através de medições de volume de tráfego, aquando o custeamento dos valores monetários associados aos impactes do tráfego rodoviário, pois ao longo da realização desta dissertação não foi possível obter dados relacionados com este impacte.

Foram identificados *hotspots* de acidentes entre veículo e utentes vulneráveis. Foi observado que os acidentes entre veículos e peões são mais frequentes que acidentes

entre veículos e ciclistas. Salienta-se a rua Dom Sancho I como um segmento particularmente vulnerável, onde numa extensão de cerca de 200 metros ocorreram 6 acidentes envolvendo veículos e utentes vulneráveis num espaço temporal entre o ano de 2012 e 2015, provavelmente devido a esta rua pertencer à EN 230 e ter cerca de 4 intersecções.

Nos dois testes de otimização de rota realizados à base de dados, os resultados foram satisfatórios. Num primeiro teste equacionou-se uma viagem com três rotas baseadas numa sugestão dada pelo Google Maps, e foi possível quantificar os impactes para as três rotas sugeridas, assim como associar um custo a cada uma. Foi igualmente testado um fator relacionado com a exposição das populações aos impactes, associando o mesmo a zonas onde se espera uma maior densidade populacional, como zonas habitacionais e zonas sensíveis como escolas, hospitais e áreas de turismo, refletindo a importância que este fator pode ter num caso de otimização de rota. Sugere-se, portanto, que sejam quantificadas, em várias vias da rede em estudo, a população afetada pelos impactes considerados. No deslastre do custo associado às três rotas em estudo, obtiveram-se valores relativos mais altos para o custo associado aos impactes ambientais, com o custo associado ao ruído a ser também significativo. O peso relativo do ruído difere bastante daquele considerado por Cravioto et al. (2013) e Anderson et al. (2016), devendo-se provavelmente à metodologia aplicada para custear o ruído que tem como base um fator relacionado com o comprimento da via e não com os níveis de ruído observados. De forma a obter um custo associado ao ruído mais preciso, são necessários dados como exposição às populações e de volume de tráfego. O custo com a aplicação do fator de correção associado à exposição das populações subiu cerca de 5%. No segundo teste, estudou-se o fenómeno do congestionamento onde se verificou o tempo de viagem que era necessário ter num dos segmentos de rede (Al. Silva Rocha) da rota natural para efetuar o trajeto entre a rotunda anexa à Al. Silva Rocha e a EN 109 para que compense optar por um trajeto alternativo bem mais longo (cerca de 700m, 43% mais longo). No caso de veículos a *diesel*, independentemente do tempo de espera testado no segmento de rede congestionado, nunca compensa ir pela rota alternativa (em termos de custos ambientais), no entanto para veículos a gasolina, quando se obtém um tempo de espera superior a 4 minutos e 30 segundos os custos ambientais são inferiores na rota alternativa em relação à rota natural. Com este caso de estudo foi possível comprovar que as condições de tráfego têm influência nos resultados finais.

Salienta-se nesta dissertação que dados como volume de tráfego e de exposição das populações são imprescindíveis ao custeamento das várias vias que compõem uma rede urbana. No entanto, ambos os fatores são variáveis ao longo do dia, sugerindo-se que estes dados sejam recolhidos a tempo real, tal tarefa será desenvolvida (coordenado pelo Instituto de Telecomunicações de Aveiro, com o Centro de Tecnologia Mecânica e Automação a fazer parte do consórcio) no âmbito do projeto “*Mobiwise: from Mobile Sensing to Mobility Advising*” (UA., 2017), não tendo os mesmos sido incluídos nesta dissertação pois a plataforma de recolha de dados ainda não se encontra em execução.

Sintetizando, como principais conclusões evidencia-se:

- Uma base de dados com as vulnerabilidades recorrentes dos impactes do sistema de transportes rodoviário pode ser utilizada como ferramenta para identificação de *hotspots* de emissões e acidentes rodoviários, podendo ser utilizada numa perspetiva de ordenamento do território;
- A importância em aferir emissões em condução real, uma vez que o valor médio verificado é superior ao recomendado;
- A alocação de um custo associado a cada segmento de rede pode ser um indicador utilizável numa perspetiva de otimização de rota;
- É essencial a obtenção de dados de volume de tráfego, de forma a otimizar a base de dados com valores mais próximos da realidade, entrando com uma variável relacionada com o congestionamento, e de exposição das populações de forma a otimizar o custeamento de impactes.

Como trabalhos futuros sugerem-se:

- Criação de uma plataforma dinâmica que permita recolher dados em tempo real devido à volatilidade associada ao tráfego rodoviário, para melhorar, por exemplo, a precisão do custeamento do ruído;
- Comparação e validação dos valores estimados de ruído com dados experimentais;
- Otimização do custeamento dos segmentos de rede, entrando com mais variáveis como o congestionamento, uso de combustível e todos os acidentes rodoviários (não só os que envolvem utentes vulneráveis da via);
- Recolha e tratamento dos acidentes entre todos os veículos rodoviários;
- Criação de uma plataforma que permita de forma automatizada a otimização de rota recorrendo aos custos associados a cada segmento da rede rodoviária de Aveiro.



## 6. Referências bibliográficas

---

@CRUISE. (2017). @CRUISE - Advanced Impact Integration Platform for Cooperative Road Use. Acedido a 25 de Outubro de 2017, em <https://project-cruise.weebly.com/>

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2016). *Relatório do Estado do Ambiente em Portugal* 2016. Recuperado de <http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/REA/REA2016/REA2016.pdf>

Ahn, K., & Rakha, H. (2008). *The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 13(3), 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.01.005>

Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, T. A. (2016). *Autonomous Vehicle Technology*. Acedido a 16 de Outubro de 2017, em [https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RR443-2.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-2.html)

Bandeira, J.M., Carvalho, D. O., Khattak, A. J., Roupail, N. M., Fontes, T., Fernandes, P., Coelho, M. C. (2016a). *Empirical assessment of route choice impact on emissions over different road types, traffic demands, and driving scenarios*. International Journal of Sustainable Transportation, 10(3), 271–283. <https://doi.org/10.1080/15568318.2014.901447>

Bandeira, Jorge M., Fernandes, P., Fontes, T., Pereira, S. R., Khattak, A. J., & Coelho, M. C. (2017). *Exploring multiple eco-routing guidance strategies in a commuting corridor*. International Journal of Sustainable Transportation, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1328545>

Bandeira, Jorge M., Guarnaccia, C., Fernandes, P., & Coelho, M. C. (2016b). *Advanced Impact Integration Platform for Cooperative Road Use*. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13177-016-0133-z>

Bellucci, P., Peruzzi, L., & Cruciani, F. R. (2016). *Implementing the Dynamap system in the suburban area of Rome (pp. 6396–6407)*. Presented at the Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future.

Bellucci, Patrizia, Peruzzi, L., & Zambon, G. (2017). *LIFE DYNAMAP project: The case study of Rome*. Applied Acoustics, 117, Part B, 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.04.022>

Boltze, M., & Tuan, V. A. (2016). *Approaches to Achieve Sustainability in Traffic Management*. Procedia Engineering, 142, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.033>

Boriboonsomsin, K., Barth, M. J., Zhu, W., & Vu, A. (2012). *Eco-Routing Navigation System Based on Multisource Historical and Real-Time Traffic Information*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 13(4), 1694–1704. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2204051>

Bright Hub Engineering. (2010). *Applications of GIS in Road Traffic Management*. Acedido dia 5 de Abril de 2017, em <http://www.brighthubengineering.com/structural-engineering/101451-graphical-information-systems-and-road-traffic-management/>

Cai, M., Zou, J., Xie, J., & Ma, X. (2015). *Road traffic noise mapping in Guangzhou using GIS and GPS*. Applied Acoustics, 87, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.06.005>

Chalkias, C., & Lasaridi, K. (2009). *A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: The case study of Nikea, Athens, Greece*. WSEAS Transactions on Environment and Development, 5(10), 640–650.

Chrpa, L., Magazzeni, D., McCabe, K., McCluskey, T. L., & Vallati, M. (2015). *Automated planning for urban traffic control*. Presented at the 6th Italian Workshop on Planning and Scheduling, IPS 2015. Recuperado de [https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/publications/automated-planning-for-urban-traffic-control\(cc05a23c-1545-4ecd-80a6-f82722fc296d\)/export.html](https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/publications/automated-planning-for-urban-traffic-control(cc05a23c-1545-4ecd-80a6-f82722fc296d)/export.html)

Çolakkadioğlu, D., & Yücel, M. (2017). *Modeling of Tarsus-Adana-Gaziantep highway-induced noise pollution within the scope of Adana city and estimated the affected population*. Applied Acoustics, 115, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.029>

Comissão Europeia (CE). (2011). *Livro Branco. Roteiro do espaço único europeu dos transportes - Rumo a um sistema de transportes competitivo e económico em recursos*. Acedido a 10 de Julho de 2017 em <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex:52011DC0144>

Comissão Europeia (CE). (2017). *Statistical Pocketbook - EU TRANSPORT in figures 2017*. Acedido a 10 de Julho de 2017, em <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/pocketbook2017.pdf>

Cravioto, J., Yamasue, E., Okumura, H., & Ishihara, K. N. (2013). *Road transport externalities in Mexico: Estimates and international comparisons*. Transport Policy, 30(Supplement C), 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.08.004>

Direção Geral do Território (DGT). (2016). *Habitat III – National Report Portugal*. Recuperado de [http://habitat3.org/wp-content/uploads/PT\\_UN-HabitatIII\\_NationalReport\\_2016\\_08\\_04\\_EN.pdf](http://habitat3.org/wp-content/uploads/PT_UN-HabitatIII_NationalReport_2016_08_04_EN.pdf)

European Environment Agency (EEA). (2014). *Air Pollution fact sheet 2014 - Portugal*. Acedido a 11 de Fevereiro de 2017, em <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-country-fact-sheets-2014/portugal-air-pollutant-emissions-country-factsheet/view>



European Environment Agency (EEA). (2015). *Evaluating 15 years of transport and environmental policy integration — TERM 2015: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe — European Environment Agency*. Acedido a 6 de Fevereiro de 2017, em <http://www.eea.europa.eu/publications/term-report-2015>

European Environment Agency (EEA). (2016a). *Statistical pocketbook 2016 - Mobility and Transport - European Commission*. Acedido a 6 de Fevereiro de 2017, em [/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016\\_en](http://transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016_en)

European Environment Agency (EEA). (2016b). *Air quality in Europe — 2016 report — European Environment Agency*. Acedido a 6 de Fevereiro de 2017, em <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2016>

European Environment Agency (EEA). (2016c). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2016*. Acedido a 19 de Dezembro de 2017, em <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>

Fameli, K. M., & Assimakopoulos, V. D. (2015). *Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters*. Science of The Total Environment, 505, 770–786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.015>

Gianpiero, M., Andrea, B., Massimiliano, C., Matteo, S., Mirko, C., Luca, C., & Roberto, K. (2015). *GIS-based decision support system for multi criteria analysis of intermodal transport networks*. Presented at the 2015 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation/ International Technology Management Conference, ICE/ITMC 2015. <https://doi.org/10.1109/ICE.2015.7438674>

Kellner, F. (2016). *Exploring the impact of traffic congestion on CO2 emissions in freight distribution networks*. Logistics Research, 9(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s12159-016-0148-5>

King, E. A., Murphy, E., & Rice, H. J. (2011). *Evaluating the impact on noise levels of a ban on private cars in Dublin city center, Ireland*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 16(7), 532–539. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.002>

Kingham, S., Longley, I., Salmond, J., Pattinson, W., & Shrestha, K. (2013). *Variations in exposure to traffic pollution while travelling by different modes in a low density, less congested city*. Environmental Pollution, 181, 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.030>

Korzhenevych, A., Bröcker, J., Holtkamp, H. M., Gibson, G., Varma, A., & Cox, V. (2014). *Update of the Handbook on External Costs of Transport*.

Le Maître, H. (2015). *Noise Costs for Road Traffic*. Presented at 94th Annual Meeting of the 23 Transportation Research Board, Washington DC.

Luo, X., Dong, L., Dou, Y., Zhang, N., Ren, J., Li, Y., Yao, S. (2017). *Analysis on spatial-temporal features of taxis' emissions from big data informed travel patterns: a case of Shanghai, China*. Journal of Cleaner Production, 142, 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.161>

Mohaymany, A. S., Shahri, M., & Mirbagheri, B. (2013). *GIS-based method for detecting high-crash-risk road segments using network kernel density estimation*. Geo-Spatial Information Science, 16(2), 113–119. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.766396>

Omnagen. (2017). *NOx emissions – formation, reduction and abatement*. Acedido a 8 de Setembro de 2017 em <http://clean-carbonenergy.com/nox-emissions.html>

Open Street Maps. (2017). *Routing*. Acedido a 20 de Setembro de 2017 em <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Routing>

PORDATA (2017a). *Densidade populacional*. Acedido a 18 de Dezembro de 2017 em <https://www.pordata.pt/Municipios/Densidade+populacional>

PORDATA. (2017b). *PORDATA*. Acedido a 10 de Outubro de 2017 em <http://www.pordata.pt>

Puliafito, S. E., Allende, D., Pinto, S., & Castesana, P. (2015). *High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina*. Atmospheric Environment, 101, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.040>

Quinet, E. (2004). *A meta-analysis of Western European external costs estimates*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 9(6), 465–476. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2004.08.003>

Rankavat, S., & Tiwari, G. (2016). *Pedestrians risk perception of traffic crash and built environment features - Delhi, India*. Safety Science, 87, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.009>

Rao, R. S., Swargam, S., & Rao, G. V. (2017). *Mapping Of spatial variations of different vehicular emissions in urban roads - A case study*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(9), 572–579.

Roman, D. R., & Ritchie, S. G. (2017). *Accounting for population exposure to vehicle-generated pollutants and environmental equity in the toll design problem*. International Journal of Sustainable Transportation, 11(6), 406–421. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1266423>

Selvasofia, A. S. D., & Arulraj, P. G. (2016). *Accident and traffic analysis using GIS*. Biomedical Research (India), 2016(Special Issue 2), S103–S106.

Sharma, S., & Patil, K. V. (2016). *Emission scenarios and health impacts of air pollutants in Goa*. Aerosol and Air Quality Research, 16(10), 2474–2487. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0664>

Singh, D., Shukla, S. P., Sharma, M., Behera, S. N., Mohan, D., Singh, N. B., & Pandey, G. (2016). *GIS-based on-road vehicular emission inventory for Lucknow, India*. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 20(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000244)

Teixeira, J. (2016). *Sistemas genéricos de gestão de informação para mobilidade inteligente*. Dissertação Mestrado Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro. Acedido a 7 de Setembro de 2017 em <https://ria.ua.pt/handle/10773/17463>

Universidade de Aveiro (UA). (2017). *New projects 2016 - FCT Projects in all Scientific Domains*. Acedido a 20 de Outubro de 2017 em [http://www.ua.pt/tema/new\\_projects\\_2016](http://www.ua.pt/tema/new_projects_2016)

Vilaça, M., Macedo, E., Tafidis, P., & Coelho, M. C. (2017). *Occurrence and severity of crashes involving vulnerable road users – An integrated spatial and temporal analysis*. Aceite para apresentação no 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 7-11, 2018.

VTPI. (2012). *Transportation Cost and Benefit Analysis II – Noise Costs 1–16*. Acedido a 5 de Setembro de 2017 em <http://www.vtpi.org/tca/tca0511.pdf>

Wang, J.-Y., & Xu, H.-C. (2016). *Transportation route optimization with cost object in China*. Cluster Computing, 19(3), 1489–1501. <https://doi.org/10.1007/s10586-016-0618-1>

WinACC. (2015). *Petrol cars versus diesel cars: making a choice based on climate and health considerations*. Acedido dia 10 de Outubro de 2017 em [http://winacc.org.uk/sites/default/files/attachments/Petrol%20versus%20diesel%20for%20web%202015\\_12\\_15.pdf](http://winacc.org.uk/sites/default/files/attachments/Petrol%20versus%20diesel%20for%20web%202015_12_15.pdf)

World Health Organization (WHO). (2015). *WHO | Global status report on road safety 2015*. Acedido dia 6 de Fevereiro de 2017 em [http://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2015/en/](http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/)

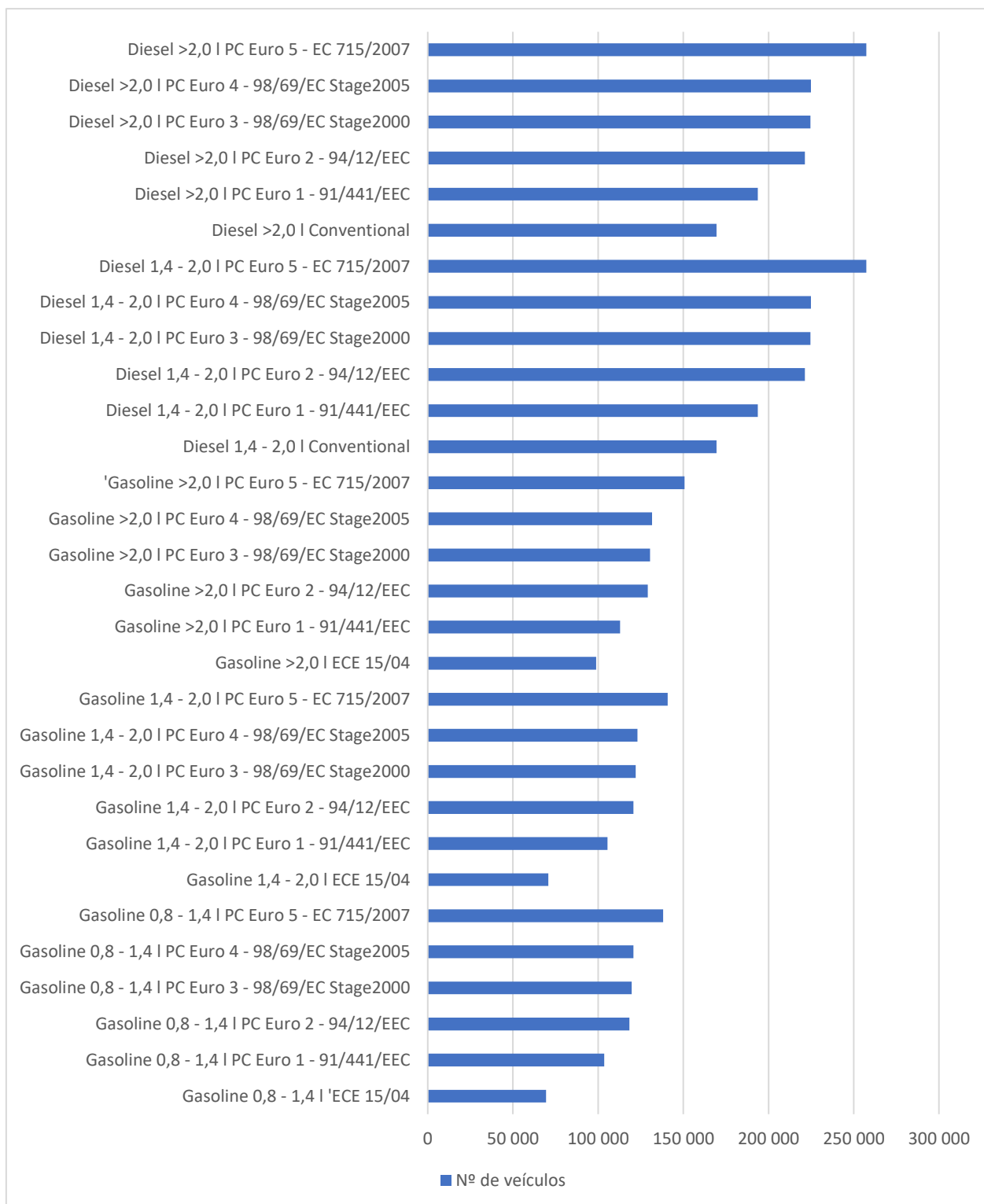
Zeng, W., Miwa, T., & Morikawa, T. (2016). *Prediction of vehicle CO2 emission and its application to eco-routing navigation*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 68, 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.007>

Zhai, H. (2007). *Regional On-road Mobile Source Emissions Characterization for Conventional and Alternative Vehicle Technologies*. Tese de Doutoramento. North Carolina State University. Acedido a 15 de Março de 2017 em <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/5150>



## 7. Anexos

### 7.1. Composição da frota automóvel portuguesa



## 7.2. Quilómetros percorridos por tipo de veículo num ano

